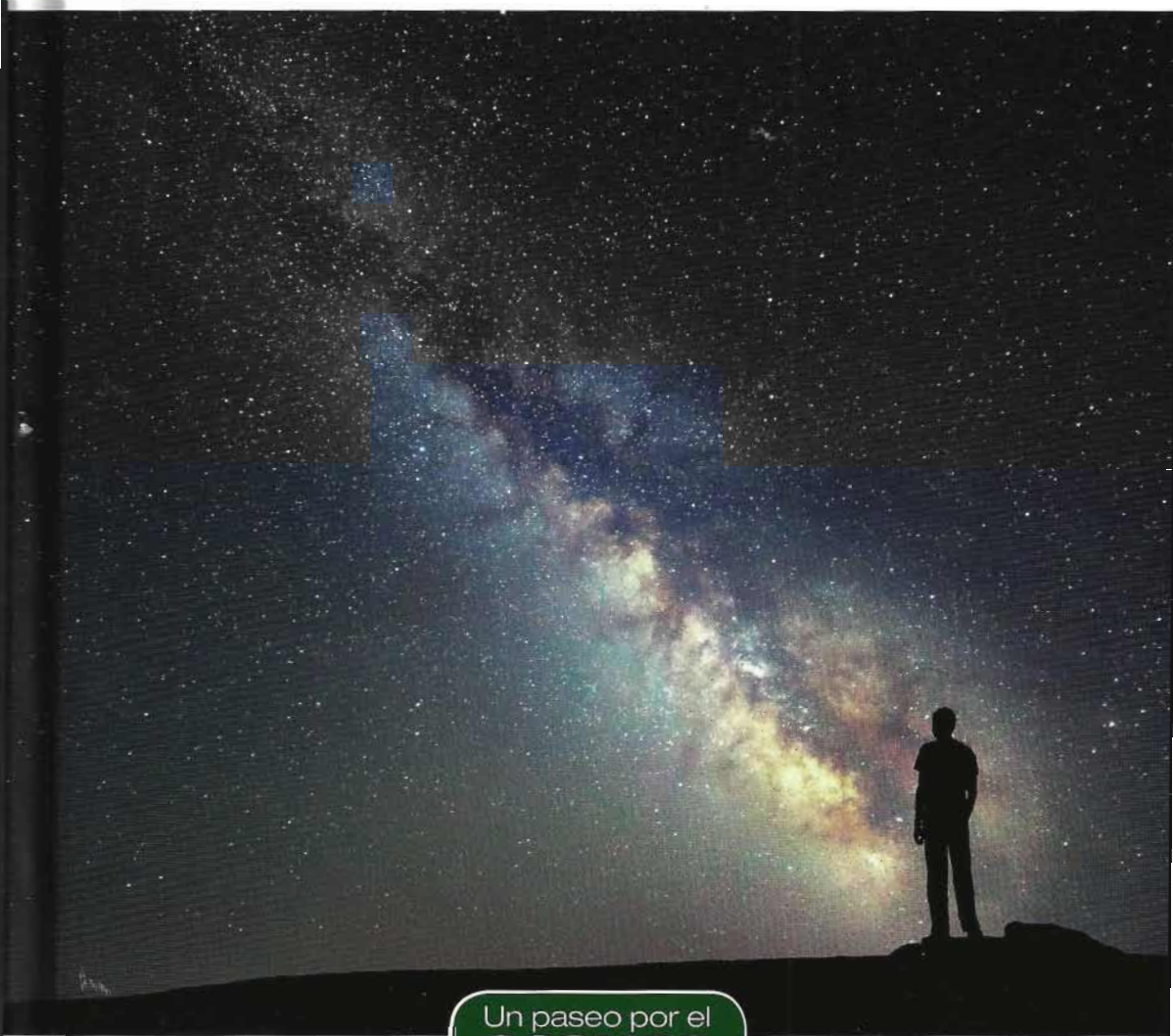


El principio antrópico

¿Puede nuestra existencia
determinar las leyes del cosmos?



Un paseo por el
COSMOS

EXLIBRIS Scan Digit



The Doctor y La Comunidad

Redigirización: The Doctor

<http://thedoctorwho1967.blogspot.com.ar/>

<http://el1900.blogspot.com.ar/>

<http://librosrevistasinteresesanexo.blogspot.com.ar/>

<https://labibliotecadeldrmureau.blogspot.com/>

El principio antrópico

¿Puede nuestra existencia
determinar las leyes del cosmos?

RBA

Imagen de cubierta: Silueta de un hombre contemplando la Vía Láctea.
Según el principio antrópico el papel del observador determina las leyes
del cosmos.

Dirección científica de la colección: Manuel Lozano Leyva

© Eduardo Arroyo Pérez por el texto
© RBA Contenidos Editoriales y Audiovisuales, S.A.U.
© 2016, RBA Coleccionables, S.A.

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: tactilestudio

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: Archivo RBA: 99; Denis Belitskiy/Dreamstime.com: portada;
Lunch/Wikimedia Commons: 89.

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de
esta publicación puede ser reproducida, almacenada
o transmitida por ningún medio sin permiso del editor.

ISBN: 978-84-473-8786-1

Depósito legal: B-24092-2016

Impreso y encuadernado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)

Impreso en España - *Printed in Spain*

SUMARIO

INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO 1	Un universo diseñado para la vida 13
CAPÍTULO 2	El argumento antrópico 41
CAPÍTULO 3	Múltiples universos y principio antrópico 63
CAPÍTULO 4	¿Es real nuestro universo? 93
CAPÍTULO 5	Consecuencias del razonamiento antrópico 117
CAPÍTULO 6	¿Es válido el principio antrópico? 139
LECTURAS RECOMENDADAS	161
ÍNDICE	163

En el sistema solar hay ocho planetas, pero solo uno de ellos es apto para la vida. Podríamos maravillarnos por la suerte que hemos tenido de aparecer justo en el único lugar que nos es favorable, pero cometeríamos un error lógico: por el mero hecho de estar vivos, tenemos por fuerza que haber nacido en la Tierra. No había otra posibilidad, porque en el resto de planetas no hay seres que puedan hacerse esta pregunta.

El anterior es un ejemplo de *razonamiento antrópico*: usar nuestra propia existencia para deducir algo sobre la región del universo donde nos encontramos. Por ejemplo, sabemos que vivimos en una época de nuestro universo que es favorable a la vida, por el simple hecho de que no podríamos hallarnos en ninguna otra. Uno puede tomar este tipo de razonamiento y elevarlo a estatus de principio, afirmando que los humanos solo pueden habitar regiones del universo que permitan la presencia de observadores. A esto se lo conoce como *principio antrópico*.

El principio antrópico ha tomado en los últimos años un protagonismo impensable hace un siglo. Nuestras teorías físicas se vuelven cada vez más refinadas y nos permiten preguntarnos sobre cuestiones que antes estaban reservadas a la metafísica o a

la religión: ¿por qué tiene el espacio tres dimensiones? ¿Por qué es nuestro universo apto para la vida? ¿Por qué estas leyes de la física y no otras?

La posibilidad de que nuestro universo tuviese leyes distintas a las que conocemos puede parecer absurda, pero empezó a ganar peso con la emergencia de la teoría de cuerdas. Al contrario de lo que todo el mundo creía, esta no cumplió su promesa de dar una explicación para todas las propiedades de las partículas conocidas: en vez de eso, daba lugar a algo llamado «el paisaje de la teoría de cuerdas», una enorme variedad de leyes de la física, la mayoría de las cuales eran completamente distintas a las nuestras.

Paralelamente al desarrollo de la teoría de cuerdas, algunos físicos empezaron a plantearse si los valores de las constantes físicas, como la carga del electrón, tenían alguna razón de ser. ¿Se trataba de un mero hecho que había que aceptar sin más o había una explicación que la interpretara? Algunos astrónomos contemporáneos, como los ingleses Paul Davies o Martin Rees, apuntaron que parecía que el universo estuviese diseñado para la vida: como si alguien hubiera estado jugando con las constantes, probando distintas combinaciones hasta encontrar una que fuera compatible con nuestra aparición. Davies y Rees se dieron cuenta de que cambios minúsculos en estas daban lugar a consecuencias catastróficas para nuestra existencia: vivimos en uno de los pocos universos que la permite. A esta coincidencia se la suele llamar *ajuste fino de las constantes*.

El caso más flagrante de ajuste fino de las constantes es el llamado *problema de la constante cosmológica*. La constante cosmológica es un término que Einstein introdujo en sus ecuaciones para asegurarse de que dieran lugar a un universo estático: puede imaginarse como una energía que se esparce por todo el cosmos, causando un efecto repulsivo que neutraliza la atracción gravitatoria. Cuando, más tarde, se descubrió que nuestro universo está en expansión, Einstein llamó a su constante «el mayor error de su vida». Sin embargo, la constante cosmológica regresó con fuerza con el descubrimiento de que el cosmos no solo se expande, sino que se acelera: la expansión se da cada vez más rápido.

La constante cosmológica era capaz de dar cuenta de la expansión acelerada del universo, pero introducía otro problema: los cálculos de su valor estaban muy lejos del resultado experimental. Se suele decir que se trata de la mayor discrepancia de la historia entre teoría y experimento. Hasta la fecha, nadie ha sido capaz de calcular el valor de la constante cosmológica usando argumentos puramente físicos: el número que se obtiene experimentalmente es muy próximo a cero, pero no nulo. En cambio, los cálculos suelen arrojar valores que, o bien son enormes, o bien son cero.

Pronto se vio que la constante cosmológica no solo era difícil de calcular, sino que además tenía una propiedad inesperada: su valor actual es uno de los pocos compatibles con la vida. Dada la falta de explicación física para el fenómeno, algunos físicos empezaron a plantearse si nuestra existencia podía tener algo que ver con lo observado.

Una de las primeras hipótesis, propuesta por algunos físicos con inclinaciones religiosas, afirmaba que el valor de la constante cosmológica indica que el universo tiene un diseñador: dado que parece tan bien ajustada para nuestra existencia, es razonable suponer que alguien la ha elegido para que sea así. Ese alguien sería Dios. Otros físicos propusieron un «principio vital»: la idea de que la función del universo es producir seres vivos.

El principio antrópico es, en parte, una respuesta a esas ideas. Uno empieza suponiendo que, en lugar de un universo, hay una multitud de ellos, cada uno con valores distintos de las constantes físicas. La mayoría de esos universos serán inhabitables, así que no estamos allá para verlos. Por lo tanto, únicamente nos podemos encontrar en uno de los universos compatibles con la vida. No necesitamos un diseñador: solo un mecanismo para generar universos.

Por suerte, disponemos de ese mecanismo. Fue propuesto en la década de 1980 por el físico estadounidense Alan Guth, en un intento de explicar por qué el universo es plano. La teoría de la inflación predice que nuestro universo es solo una burbuja en un universo mayor, al que se suele llamar *multiverso* o *megaver-*

no. El megaverso se expande con gran rapidez, mucha más de la que corresponde a nuestra burbuja, y crea un sinnúmero de otros universos, cada uno con sus leyes de la física que vienen dadas por las distintas posibilidades de la teoría de cuerdas. Dada la aceptación de la que la teoría de la inflación goza hoy en día, la existencia del multiverso parece, al menos, plausible.

Una vez establecido un mecanismo de generación de universos, el principio antrópico es capaz de dar una solución satisfactoria al problema del ajuste fino de las constantes. A pesar de que es posible aplicar el principio antrópico sin asumir una multiplicidad de universos, este pierde gran parte de su utilidad. El principio antrópico y las teorías con múltiples universos son dos caras de una misma moneda.

Por supuesto, la idea de los universos múltiples tiene detractores: la crítica más común es que se trata de una teoría acientífica, ya que los universos paralelos nunca podrán ser observados, con lo cual se trata de una afirmación imposible de contrastar. Dado que el principio antrópico pierde gran parte de su poder predictivo sin un multiverso, la defensa de ambos suele ir ligada. Hoy en día el debate está lejos de resolverse, pero hay una mayoría de físicos que respaldan la teoría de la inflación y los universos que genera.

El razonamiento antrópico tiene usos fuera de la física. El filósofo sueco Nick Boström ha pasado años explorando sus consecuencias y generalizándolo a todo tipo de situaciones. Según Boström, el principio antrópico no es más que un ejemplo particular de algo llamado un *sesgo de selección*: llegar a conclusiones incorrectas al no tener en cuenta nuestra forma de seleccionar los datos. Por ejemplo, si uno solo se rodea de gente acaudalada, puede llegar a la conclusión de que la mayoría de la población tiene mucho dinero. Es algo parecido a la sensación de que todo el país comparte nuestro punto de vista político, simplemente porque en las redes sociales solo vemos las opiniones de gente cercana a nosotros, que suele tener ideas parecidas.

Nick Boström usa los sesgos de selección para explicar todo tipo de fenómenos de nuestro día a día, como el hecho de que

casi siempre nos hallemos en el carril más lento cuando hay un atasco. Los lleva aún más lejos para argumentar que nos hallamos, casi con total certeza, en una simulación.

La idea de que nuestra realidad podría ser simulada lleva décadas coleando. Sin embargo, Boström convierte una posibilidad remota en una cuasi certeza. Razona como sigue: si en un futuro los humanos son capaces de simular el pasado, llevarán a cabo centenares, quizá millones de simulaciones. Pero, si eso es así, entonces hay muchas más personas del siglo XXI viviendo en simulaciones que en el siglo XXI de verdad. Por lo tanto, es muy probable que vivamos en una simulación.

El escenario de la simulación es retomado por Paul Davies en el contexto de la teoría de la inflación. Según Davies, una civilización avanzada tendría que ser capaz de simular universos enteros, no necesariamente iguales a aquel donde se halle. Por lo tanto, tiene que haber un gran número de universos simulados. De hecho, dado que la gran mayoría de universos con vida inteligente dará lugar a simulaciones, tendría que haber muchos más universos simulados que universos reales. Así pues, es extremadamente probable que el universo en el que nos hallamos sea una simulación.

Tanto el razonamiento de Davies como el de Boström están basados en el principio antrópico: toman como premisa que nuestra propia existencia nos puede dar información sobre el universo en el que vivimos. Se trata de una forma poco ortodoxa de razonar en física, donde las explicaciones suelen ser causales: usar un hecho presente, como que estamos vivos, para explicar un hecho pasado, como la constitución del universo, es visto con recelo por muchos científicos. Que los razonamientos antrópicos nos lleven a conclusiones aparentemente absurdas, como que vivimos en una simulación, no ayuda a su popularidad. Tampoco ayuda que algunos físicos hayan malinterpretado el principio antrópico, haciendo afirmaciones acientíficas como que el universo ha sido diseñado para que surja la vida.

El principio antrópico es una de esas afirmaciones que no dejan indiferente a nadie. Según algunos físicos, se trata de algo completamente obvio que, además, nos puede ayudar a resolver

algunas de las cuestiones más profundas sobre la realidad que habitamos. Para otros, se trata o bien de un sinsentido o bien de religión disfrazada de física. Las próximas décadas de desarrollo científico determinarán quién tiene razón.

Un universo diseñado para la vida

La física del siglo xx abrió la puerta a preguntarse por qué las distintas fuerzas del universo tienen la intensidad que observamos. Una serie de coincidencias misteriosas apuntan la posibilidad de que esos valores no fueran aleatorios. ¿Fueron, quizá, elegidos para dar lugar a la vida inteligente?

¿Por qué las leyes de la física son las que son? La pregunta puede parecer absurda. ¿Acaso podrían haber sido diferentes? Al fin y al cabo, la ciencia avanza asumiendo que el universo se rige por leyes y que nuestro cometido es descubrirlas, pero no puede preguntarse por las leyes en sí. Eso, suele decirse, entra en el terreno de la metafísica, de la filosofía o de la religión, pero no es ciencia. El porqué de las leyes del universo es una cuestión que trasciende a la ciencia.

Sin embargo, no todo el mundo está de acuerdo. Hoy en día, la teoría de consenso, el *modelo estándar*, está controlada por diecinueve números. Uno puede imaginar la situación como si el universo fuera un mecanismo regido por diecinueve mandos graduables. Cada uno de ellos regula un aspecto distinto: por ejemplo, uno modifica la intensidad de la fuerza electromagnética; otro, la masa de ciertas partículas elementales. Nuestro universo corresponde a una posición determinada de esos controles, pero ¿podría haber sido distinto? No hay nada en el modelo estándar que lo prohíba.

La cuestión se vuelve aún más interesante cuando uno se da cuenta de que, si esos números hubieran sido un poco diferen-

tes, la vida tal y como la conocemos no sería posible. Nuestra existencia parece depender de una elección particular de esos diecinueve números. En algunos casos, una diferencia minúscula en uno de ellos daría lugar a un universo completamente distinto y desprovisto de vida inteligente. Se podría pensar que los parámetros del modelo estándar han sido ajustados a propósito para ser compatibles con la vida.

Por supuesto, puede que se trate de una coincidencia. También puede ser que exista una razón profunda para los valores de esos números, que será revelada al encontrar una teoría mejor que las actuales. Algunos físicos sostienen que no hay nada que explicar: el universo es el que es y no tiene sentido preguntarse si podría haber sido de otra forma. Otros, sin embargo, opinan que el fenómeno requiere explicación. Una de las teorías más populares es el llamado *principio antrópico*: solo un universo compatible con la vida da lugar a observadores como nosotros. Así pues, el universo tiene que ser compatible con la vida o no estaríamos aquí para verlo.

JUGANDO CON EL TABLERO DE MANDOS DEL UNIVERSO

A los valores de esos diecinueve números del modelo estándar que dan lugar a nuestro universo se los suele llamar *parámetros* o *constantes*. Y la pregunta que queremos responder es ¿por qué están esos parámetros tan bien ajustados para la vida? Quizá se trate de una coincidencia, pero es poco probable. Para ver hasta qué punto es improbable, resulta útil plantearse qué pasaría si decidiésemos cambiar algunos de esos números aleatoriamente. A pesar de que no forma parte del modelo estándar, la intensidad de la fuerza gravitatoria parece un candidato perfecto, ya que afecta a nuestra realidad cotidiana de forma notable y algunos parámetros de dicho modelo, como la masa del bosón de Higgs, tienen un gran efecto sobre ella.

La gravedad es una fuerza débil en extremo. Por ejemplo, si se compara la atracción gravitatoria entre dos protones con su repulsión eléctrica, se ve que la fuerza eléctrica es aproximada-

mente 10^{36} veces (un uno seguido de treinta y seis ceros) mayor que la gravitatoria. Para hacerse una idea, esta es la misma proporción que se da entre el diámetro del universo observable y el de un átomo. Que la gravedad es una interacción débil puede resultar una afirmación extraña, dado que en nuestro día a día la sentimos con gran intensidad. La razón es que se trata de una fuerza solo atractiva y de largo alcance, de forma que su efecto se acumula a grandes escalas. Hace falta un número enorme de átomos para lograr un efecto gravitatorio apreciable: por eso no sentimos atracción gravitatoria alguna hacia otras personas y se requiere algo tan enorme como la Tierra para anclarnos al suelo.

Hoy en día, nadie sabe por qué la gravedad es tan débil. Algunos físicos han aventurado distintas conjeturas pero, de momento, no hay ninguna teoría que satisfaga a todo el mundo. Lo que sí está claro es que, si la fuerza de la gravedad hubiera sido algo mayor, no estaríamos aquí para verlo. La gravedad es la fuerza que controla el tamaño de las estructuras del universo. Cada fuerza crea estructuras de distintos tamaños, relacionadas con su intensidad. Por ejemplo, un átomo es una estructura que tiene su origen en la interacción electromagnética entre electrones y protones; el núcleo atómico, por otro lado, se forma debido a la llamada *interacción fuerte* entre *quarks*, las partículas de las que están hechos protones y neutrones. Cuanto mayor es la fuerza, menores son las estructuras que forma, porque se requiere más y más energía para separar sus componentes.

La debilidad de la gravedad es lo que hace posible la formación de estructuras a gran escala en el universo. También gobierna la duración del ciclo de vida de las estrellas o su límite de masa antes de transformarse en un agujero negro. Además, la intensidad de la gravedad determina la expansión del universo: una gravedad más fuerte causaría el colapso casi instantáneo del cosmos, de modo que no habría habido tiempo de formar galaxias y estrellas, y mucho menos planetas capaces de albergar la vida. Incluso si el universo tuviese tiempo de llegar a la madurez, las estrellas tendrían un ciclo de vida mucho más corto, porque haría falta mucha más energía para equilibrar la presión ejercida por el peso de la propia estrella. Las estrellas serían me-

nores y vivirían menos, lo que daría menos tiempo a la vida para desarrollarse; cualquier ser vivo tendría que ser más pequeño y, por lo tanto, habría un límite a su complejidad.

Se pueden realizar experimentos similares con diferentes constantes. En su libro *Solo seis números*, el astrónomo Martin Rees (n. 1942) se dedica a explorar los distintos números que él considera importantes para la vida y cómo pequeñas modificaciones en estos tendrían consecuencias nefastas para la existencia de observadores inteligentes. Por ejemplo, si la eficiencia de la reacción nuclear que se da en el núcleo de una estrella fuese un poco mayor, todo el hidrógeno presente al inicio del universo se habría transformado en helio, lo que significaría que la existencia del agua no sería posible. Si, por el contrario, hubiese sido un poco menor, la reacción nuclear que sostiene el brillo de una estrella no tendría lugar, dejando un universo donde solo quedaría hidrógeno. Esto impediría la formación de cualquier tipo de estructura compleja.

A pesar de que los ejemplos que da Rees son interesantes, un proponente de la teoría de la coincidencia podría argumentar que no se trata de ajustes muy finos: la eficiencia de las reacciones nucleares tendría que cambiar en casi un 20% para tener un efecto en la vida de las estrellas, lo que no es poco. Por lo que respecta a la gravedad, hay algunas hipótesis que podrían explicar su debilidad dentro de los límites de la *teoría de cuerdas*, que se espera acabe sustituyendo al modelo estándar en el futuro. Sin embargo, hoy el problema se ha vuelto mucho más difícil de ignorar, debido a la reciente observación de que, al contrario de lo que se creía, la expansión de nuestro universo se está acelerando.

EL UNIVERSO EN EXPANSIÓN

Cuando el célebre científico inglés Isaac Newton (1643-1727) escribió sus famosas tres leyes de la mecánica, se enfrentó con el problema de decidir cuándo un sistema era *inercial*: es decir, cuándo un objeto se movía a velocidad constante y en línea recta. La cuestión puede parecer simple, pero no lo es en absoluto.

LA PROPORCIÓN ENTRE LA FUERZA GRAVITATORIA Y LA ELÉCTRICA

El cálculo de la proporción entre la fuerza gravitatoria y la eléctrica es relativamente sencillo; basta con comparar la fuerza repulsiva eléctrica entre dos protones y su atracción gravitatoria. Para ello, usaremos la fórmula de la gravitación universal de Newton y la fórmula para la fuerza de Coulomb.

La gravitación universal de Newton nos dice que la fuerza entre dos masas es proporcional a ambas e inversamente proporcional a la distancia al cuadrado, es decir:

$$F_g = G \frac{m_p^2}{r^2},$$

donde m_p es la masa del protón y r la distancia entre ambos. G es la constante de la gravitación de Newton, igual a $6,6735 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg} \cdot \text{s}^2$.

Por otro lado, la fuerza eléctrica entre ambos protones viene dada por:

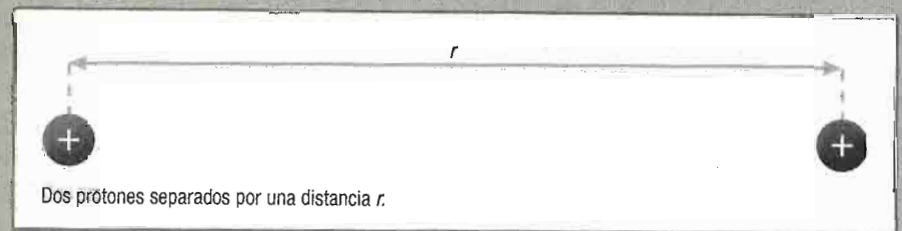
$$F_e = k \frac{e^2}{r^2},$$

donde k es la constante eléctrica, e es la carga del electrón (igual a la del protón pero de signo contrario) y r es, de nuevo, la distancia entre ambos.

Podemos ahora calcular la proporción entre las dos fuerzas dividiendo la una por la otra. Obtenemos:

$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{k \frac{e^2}{r^2}}{G \frac{m_p^2}{r^2}} = \frac{ke^2}{Gm_p^2} = 1,2 \cdot 10^{36}.$$

Es decir, la repulsión eléctrica entre dos protones es inmensamente mayor que su atracción gravitatoria. Por esa razón es legítimo ignorar la gravedad al tratar cualquier sistema de partículas en el ámbito microscópico; esta es también la razón por la cual es tan difícil investigar efectos cuánticos en la gravedad: no disponemos de la tecnología suficiente para medir la fuerza gravitatoria entre dos partículas microscópicas.



Por ejemplo, ¿se mueve un tren a velocidad constante? Depende. Quizá lo hace para un observador sentado en la estación, pero no lo hace para alguien en el Sol, que sabe que el tren está en la Tierra y que la Tierra se mueve en una trayectoria elíptica, no en línea recta. Entonces ¿se mueve el Sol en línea recta? De nuevo, según quién lo mire. Para alguien en el centro de nuestra galaxia, no. ¿Y el centro de la galaxia? Pues, de nuevo, dependerá del observador. El problema de Newton era que sus leyes solo funcionaban para observadores moviéndose en línea recta y a velocidad constante, con lo cual se enfrentaba con una dificultad mayúscula: si no podía dilucidar quién se movía en línea recta y quién no, tampoco podía esclarecer cuándo se aplicaban sus leyes.

Newton encontró una solución definiendo un sistema inercial como algo que se mueve en línea recta y a velocidad constante respecto a las «estrellas fijas». En la época de Newton las estrellas parecían estar ancladas al cielo y constituían el ejemplo perfecto de sistema inercial. Así que uno solo tenía que fijarse en estas para decidir si también se movía en línea recta y a velocidad constante.

Por supuesto, hoy sabemos que las estrellas fijas no están fijas en absoluto, sino que se mueven alrededor del núcleo galáctico, que tampoco está quieto. Sin embargo, la idea de que el universo tiene que ser estático parece algo tan obvio que incluso Einstein estuvo convencido de ello durante buena parte de su vida.

Cuando Einstein creó su teoría de la relatividad general en 1915, pronto se dio cuenta de que esta hacía una predicción inquietante: dado que la gravedad es siempre atractiva, no había forma de que el universo se mantuviese estático. Usando sus ecuaciones, varios físicos dieron con modelos que, o bien acababan en una gran implosión, o bien se expandían para siempre. Para Einstein eso era inaceptable, así que modificó su teoría para incluir la posibilidad de un universo en equilibrio, añadiendo lo que dio en llamar la *constante cosmológica*. Esa constante proveía una fuerza repulsiva que contrarrestaba la gravedad, de forma que el universo resultante se podía mantener indefinidamente en el mismo estado.

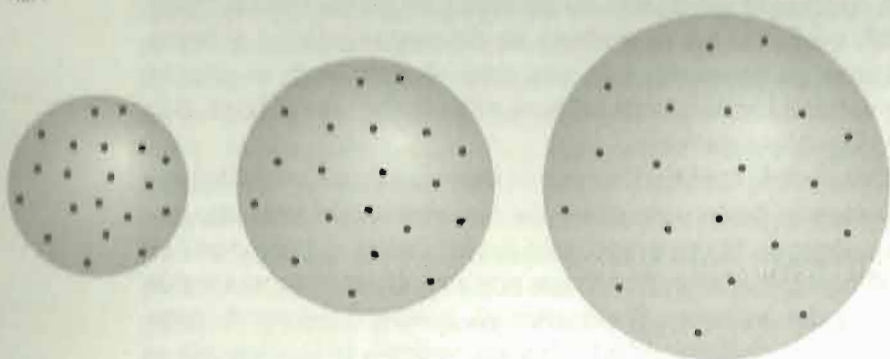
Sin embargo, pronto se vio que el universo era de todo menos estático; el astrónomo estadounidense Edwin Hubble (1889-1953) analizó la luz procedente de diferentes galaxias y descubrió que, en promedio, parecían estar alejándose de la nuestra. No solo eso: cuanto más lejos se encontraba una galaxia, más rápido parecía moverse.

Una posible explicación era que nuestra galaxia actuaba como una especie de foco repulsivo del que el resto del universo tendía a alejarse. Sin embargo, esto iba en contra del *principio de mediocridad*: la asunción de que nos encontramos en una región normal del universo. El principio de mediocridad puede parecer un requerimiento *ad hoc* pero, en realidad, se fundamenta en la teoría de la probabilidad. Supongamos que el universo tiene un millón de regiones distintas, de las que una es especial: entonces, hay una probabilidad de una entre un millón de que nos encontremos en esa región. Así pues, tenemos que suponer que nos encontramos en un sitio relativamente común en el cosmos, simplemente porque es lo más probable.

Hubble vio que, en promedio, las galaxias se estaban alejando de la Tierra. La probabilidad de que nuestra galaxia sea especial en ese sentido es prácticamente cero. Por lo tanto, tenemos que suponer que cualquier persona en cualquiera de esas galaxias tendrá que observar algo parecido a lo que vemos nosotros.

Las observaciones de Hubble llevaron a la comunidad física a una conclusión que hoy parece obvia: el universo se expande. Hay, sin embargo, una gran confusión sobre lo que significa que el universo esté en expansión. ¿Qué es lo que se expande? ¿Las galaxias? ¿Las estrellas? En realidad, lo que se expande es el espacio mismo. Para entender lo que esto significa se suele usar la analogía de un globo: supongamos que tenemos un globo deshinchado y pintamos puntos en su superficie (figura 1). Si ahora empezamos a hinchar el globo, se expande el plástico en sí, lo que causa un aumento de la distancia entre puntos. Si imaginamos que nos hallamos en uno de esos puntos, veremos que la distancia a cualquier punto a nuestro alrededor ha aumentado: parece como si todos ellos se alejaran de nosotros. Sin embargo, lo que pasa es que la superficie del globo está aumentando de tamaño.

FIG. 1



A medida que el globo se ensancha, la distancia entre dos puntos cualesquiera también aumenta.

Además, la distancia aumenta más rápido cuanto más alejado de nosotros está el siguiente punto, porque al haber más espacio en medio la distancia aumenta más. Por lo tanto, veremos que los puntos más lejanos a nosotros se distancian más rápido que los cercanos.

En nuestro universo pasa algo parecido, con la gran diferencia de que la «superficie» donde habitamos tiene tres dimensiones y no dos, como en el globo. El universo se parece a una esfera de cuatro dimensiones, con un radio que aumenta con el tiempo. Las galaxias ancladas a su superficie se alejan unas de las otras y parece que se muevan, cuando en realidad lo que sucede es que el espacio en el que habitan se está ensanchando.

Extrapolando la expansión hacia el pasado, parecía claro que el universo tenía que haber empezado en un estado de densidad infinita y tamaño nulo, después de lo cual empezó a expandirse a gran velocidad en una gran explosión que fue bautizada como *Big Bang*.

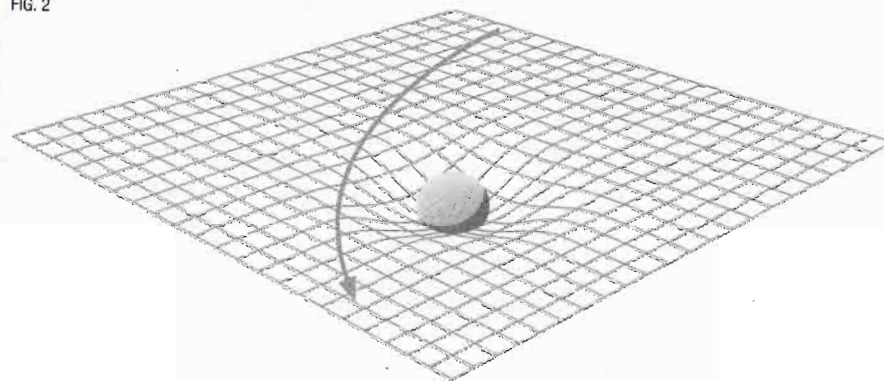
La teoría del Big Bang daba una explicación consistente del movimiento aparente de las galaxias y eliminaba la necesidad de la constante cosmológica de Einstein. Sin embargo, a medida que la teoría se desarrollaba empezaron a surgir otros pro-

blemas. Los físicos se dieron cuenta de que, para que la teoría funcionara correctamente, la densidad de materia del universo tendría que haber sido ajustada a un nivel de precisión absurdo, sin que hubiera mecanismo alguno que lo justificara. Se trata de un ejemplo perfecto de lo que los físicos llaman *ajuste fino de las constantes*: aparentes coincidencias en el valor de un parámetro de la teoría sin las cuales todo el edificio se vendría abajo.

LA GRAVEDAD COMO DISTORSIÓN DEL ESPACIO-TIEMPO

La teoría de la relatividad general de Einstein parte de una idea radical: la gravedad no es una fuerza, sino el efecto de la curvatura del *espacio-tiempo*, una estructura que engloba tanto el espacio como el tiempo. Los objetos masivos distorsionan el espacio a su alrededor, de forma que trayectorias anteriormente rectas se vuelven curvas, creando por ejemplo las órbitas planetarias. Uno puede imaginar que el espacio es una especie de red elástica que se vence al poner un peso en ella (figura 2), lo que hace que otros objetos próximos caigan hacia el objeto más pesado.

FIG. 2



Un objeto masivo distorsiona el espacio a su alrededor. Los objetos atraídos por él lo harán siguiendo órbitas elípticas.

No obstante, se trata de una imagen engañosa, porque depende en sí misma de la gravedad. Nuestra red se vence debido al peso del objeto, que es causado por la fuerza de la gravedad que lo atrae hacia el suelo. De la misma forma, los demás objetos caen hacia el primero también a causa de la gravedad. En realidad, lo que pasa es que el espacio se distorsiona hasta tal punto que las trayectorias se curvan alrededor de una masa. Es decir, un objeto que orbita un planeta parece moverse en una línea recta, pero esa línea está doblada hasta tal punto que acaba por describir una elipse.

Dado que la gravedad distorsiona el espacio, uno puede preguntarse si el efecto acumulativo de toda la materia en el universo modificará su geometría a gran escala. La respuesta es afirmativa: dependiendo de la cantidad de materia en su interior, el universo tendrá diferentes curvaturas que darán lugar a tres tipos de geometría: abierta, cerrada y plana (figura 3).

Los tres tipos de universo empiezan de la misma forma: en un estado infinitamente denso que se expande a gran velocidad. Luego se comportan de formas muy distintas, dependiendo de la densidad de materia en el universo.

Si el universo tiene mucha densidad de materia, la fuerza de la gravedad es tan poderosa que es capaz de contrarrestar la expansión inicial, forzando al universo a contraerse de nuevo después de un cierto tiempo. A este tipo de geometría se la llama *cerrada* o de *curvatura positiva* y puede compararse a la geometría en la superficie de una esfera. Para entender por qué, pensemos en qué pasará con dos líneas que empiezan paralelas durante el Big Bang: tarde o temprano se cruzarán, ya que todo el universo volverá a estar comprimido en un punto después de un tiempo suficiente. Esto puede apreciarse en la figura 4, donde el segundo dibujo muestra dos líneas que empiezan paralelas pero acaban por cruzarse.

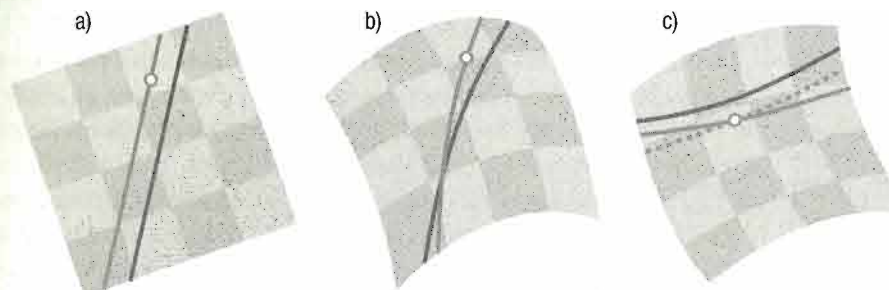
En un universo «abierto», la densidad de materia no es suficiente para frenar la expansión, que continúa hasta el infinito. En este caso, dos líneas que empiezan paralelas acabarán apuntando en direcciones distintas sin cruzarse nunca, como se puede ver en el tercer dibujo de la figura 4. La forma de un universo

FIG. 3



Las tres posibles curvaturas del universo: de izquierda a derecha, representación de universo plano, cerrado y abierto.

FIG. 4



Las paralelas nunca se cruzan en la geometría plana (a), pero sí lo hacen en la cerrada (b); en la abierta (c), se separan cada vez más, sin cruzarse. En el dibujo c) se muestran tres líneas porque existen dos posibilidades: las paralelas se separarán más y más, y las dos líneas que se cruzan también lo harán, pero más rápido que en un espacio plano.

abierto es parecida a la de una silla de montar, como se aprecia en la figura 3: la curvatura es tal que la figura se extiende para siempre, al contrario que en el caso cerrado.

Finalmente, existe la opción de que el universo sea plano: si la densidad de materia es exactamente igual a un número llamado *densidad crítica*, el universo continuará expandiéndose para siempre, pero a menos velocidad cada vez, hasta llegar a pararse después de una cantidad infinita de tiempo. Es decir: el

universo se expandirá más y más lento, sin llegar jamás a pararse, pero llegando a una tasa de expansión prácticamente igual a cero después de un tiempo suficiente. En este caso, su geometría será plana, lo que se corresponde con la geometría a la que estamos acostumbrados: dos líneas paralelas seguirán paralelas para siempre.

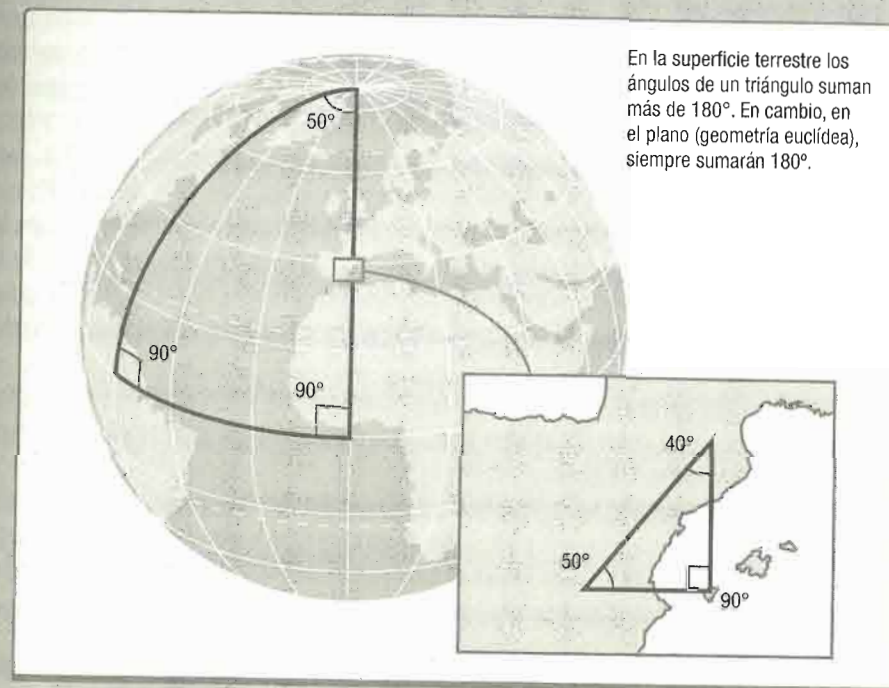
Para determinar el tipo de geometría de nuestro universo se estudia un fenómeno llamado *radiación de fondo de microondas*, que puede entenderse como un eco que procede de cuando el cosmos era muy denso y estaba muy caliente. Los cuerpos calientes emiten ondas electromagnéticas que nos dan una idea de su temperatura: cuando el universo era joven, todo él estaba bañado en radiación electromagnética de gran energía. Esta radiación se fue diluyendo a medida que el universo se expandía, hasta quedar convertida en un tenue ruido de fondo en forma de microondas.

Hoy en día es posible, gracias a satélites artificiales como el WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*) de la NASA, medir el fondo cósmico de microondas con gran precisión. Resulta que las diferentes geometrías del universo dan lugar a distintas predicciones para las fluctuaciones que tendríamos que observar en el fondo cósmico de microondas; todas las medidas hasta la fecha indican que nos encontramos en un universo plano.

En la actualidad sabemos que la densidad del universo es igual a la densidad crítica, más-menos un uno por ciento. El problema es que cualquier pequeña desviación de la densidad crítica al principio del universo se hubiera visto amplificada trillones de veces debido a su rápida expansión. Esto significa que, en el pasado, la densidad tenía que ser prácticamente igual a la densidad crítica. Es decir: si hoy la densidad del universo se desvía de la crítica en menos de un uno por ciento, en el pasado la desviación tenía que ser menos de una parte en 10^{61} (o un uno seguido de sesenta y un ceros). Para hacerse una idea de la magnitud del problema, estamos hablando de una desviación menor que el tamaño de un núcleo atómico comparado con el del universo observable. A esto se lo conoce como el *problema de la planitud*.

GEOMETRÍAS NO EUCLÍDEAS

En la escuela se suele enseñar que los ángulos de un triángulo suman 180° y que las líneas paralelas nunca se cruzan. Sin embargo, esto solo es así en un tipo especial de geometría, la llamada euclídea, debido a que fue sintetizada y expuesta por el matemático griego Euclides (325 a.C.-265 a.C.) y que corresponde a un espacio plano. La geometría euclídea estaba basada en cinco axiomas; cinco proposiciones que se daban sin demostración. Sin embargo, un gran número de matemáticos creían que uno de ellos, que afirmaba que las líneas paralelas nunca se cruzan, tenía que poder ser demostrado usando el resto. A pesar de siglos de intentos, nadie tuvo éxito. Finalmente se intentó la *reducción al absurdo*: para demostrar que el axioma de las paralelas era verdadero, se cambió por otro distinto, de manera que si este fuera falso llevaría a una contradicción. Para sorpresa de todo el mundo, eso no pasó: al sustituir el axioma de las paralelas por otro, se obtenía una geometría consistente, aunque diferente de aquella a la que estamos acostumbrados. La figura muestra un ejemplo de geometría no euclídea: la superficie de una esfera, como la de la Tierra, se puede considerar como un espacio no euclídeo de dos dimensiones. Como puede apreciarse, en ella los ángulos dentro de un triángulo no suman ciento ochenta grados; de forma similar, dos líneas que empiezan paralelas en el ecuador acaban por cruzarse en el polo norte.



El problema de la planitud llevaba de cabeza a los físicos en la década de 1970, porque se veían obligados a explicar una aparente coincidencia de sesenta y una potencias de diez. Parecía obvio que tenía que haber algún mecanismo que forzase un universo plano, sin invocar una coincidencia de proporciones literalmente cósmicas. Pero no se conocía ninguno.

No fue hasta la década de 1980 cuando el físico Alan Guth (n. 1947) encontró una solución al problema, con una teoría que fue bautizada como *inflación cósmica*. La idea era relativamente sencilla: en sus primeros instantes de vida, el universo experimentó una expansión tan increíblemente rápida que, a todos los efectos, se habría vuelto plano. Volviendo al ejemplo del globo, podemos pensar en uno perfectamente elástico que se expande tanto que, para un observador en cualquier punto, la curvatura es prácticamente cero. De forma similar, para una persona en la superficie de la Tierra es casi imposible apreciar que vive en una esfera, ya que el radio de nuestro planeta es enorme comparado con nuestro tamaño. Según Guth, si nuestro universo hubiese experimentado una expansión similar, parecería plano para cualquier observador, sin necesidad de recurrir a explicaciones esotéricas para la aparente coincidencia entre la densidad del cosmos y la densidad crítica. A esta rápida expansión inicial Guth la llamó *inflación* y, para justificarla, utilizó un concepto de la física cuántica de campos llamado *energía de vacío*.

En la mecánica cuántica, el vacío no está realmente vacío, sino que está formado por una infinidad de partículas subatómicas que aparecen y desaparecen de la nada. Esto se debe a algo llamado el *principio de incertidumbre*, que dice que uno no puede conocer con total exactitud la posición y el momento (el producto de la masa y la velocidad) de una partícula al mismo tiempo. Cuanto mejor conozca la posición, peor conocerá el momento y a la inversa.

Si uno aplica el principio de incertidumbre al espacio vacío, pronto se da cuenta de que tiene un problema: al fijarse en una

región muy pequeña del espacio, la incertidumbre en la posición es muy pequeña, lo que significa que la incertidumbre en el momento tiene que ser enorme. Sin embargo ¿el momento de qué? En esa región no hay nada.

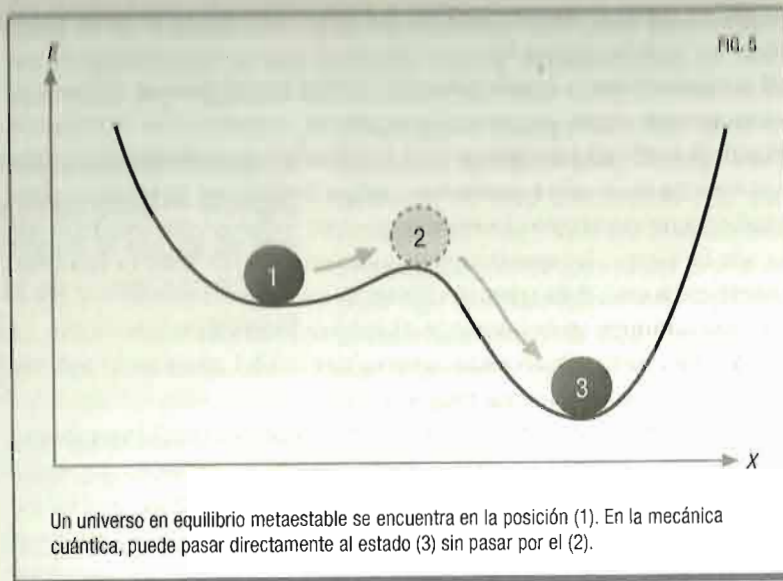
Para salir de esta aparente paradoja hay que abandonar una de nuestras asunciones: en este caso, la creencia en que el vacío está vacío. Así pues, el principio de incertidumbre nos dice que, cuanto más de cerca miremos el vacío, más partículas veremos y con más energía: el vacío no está vacío, sino que bulle de actividad. Debido a esto, tiene que tener una cierta energía, que podemos calcular. Esta energía de vacío ejerce una presión en el universo que causa su expansión.

La idea de Guth era que, en sus primeros momentos de existencia, el universo se encontraba en un *falso vacío*. El concepto del falso vacío es difícil de entender en el contexto de la física clásica. En mecánica cuántica, el vacío no se define como la ausencia de partículas, sino como el estado de menor energía. Nuestro universo no tiene por qué encontrarse en el estado de vacío, porque puede que esté en otro estado que sea el de mínima energía comparado con su alrededor, pero no globalmente. Por ejemplo, la bola número 1 en la figura 5 se encuentra en una situación así: existe un estado de menor energía donde está la bola 3, pero no hay ningún estado con menor energía en los alrededores de la bola 1. Si nuestro universo se encuentra en una situación parecida a la de la bola 1, decimos que está en un falso vacío.

En mecánica clásica, es imposible pasar del estado 1 al 3 sin una inyección de energía. En mecánica cuántica, sin embargo, no se necesita ningún empujón: un proceso llamado el *efecto túnel* hace posible saltar del estado 1 al 3 sin tener que pasar por el 2. Según Guth, el estado de falso vacío del universo causó una expansión acelerada que acabó cuando este decayó al estado de vacío «verdadero» gracias al efecto túnel, dando lugar al universo que conocemos hoy en día.

Lo que en última instancia es el espacio —debo confesar que creo que es lo que la mayoría de los físicos piensan— no lo sabemos todavía.

ALAN GUTH



La teoría de Guth es hoy aceptada casi universalmente por la comunidad física y sus predicciones han sido verificadas repetidamente en observaciones del fondo de microondas. Su solución elimina la necesidad de un ajuste fino en la densidad del universo y da una explicación elegante para la planitud observada. Por desgracia, ha surgido un problema más acuciante: en 1998, dos experimentos independientes descubrieron que, contra todo pronóstico, la expansión del universo se está acelerando, dando lugar a la mayor discrepancia de la historia entre teoría y experimento.

EL PROBLEMA DE LA CONSTANTE COSMOLÓGICA

En la década de 1990 se desarrollaron dos experimentos con el objetivo de medir la tasa de expansión del universo. Ambos se basaban en la observación de un tipo especial de proceso estelar llamado *supernova de tipo Ia*. Una supernova es una explosión cósmica causada normalmente por la implosión de una estrella

sobre sí misma. En el caso de las supernovas de tipo Ia, tenemos un sistema binario que contiene dos estrellas, una de ellas tipo *enana blanca*, que ha agotado su combustible. La enana blanca roba material de su compañera: cuando han absorbido el suficiente, su masa les permite volver a empezar una reacción nuclear en su centro, causando una emisión espectacular de radiación que destruye el sistema binario y que podemos detectar desde la Tierra. Lo que hace a las supernovas de tipo Ia tan interesantes es que, dado que la cantidad de materia que causa la explosión siempre es la misma, su brillo es constante. Eso significa que pueden ser usadas para determinar la distancia de la galaxia donde se hallan de forma muy precisa.

Dos equipos internacionales de investigación, integrantes del Proyecto Cosmológico de Supernovas (*Supernova Cosmology Project*) y del Equipo de Investigación de Supernovas High-Z (*High-Z Supernova Search Team*) se dedicaron a buscar supernovas de este tipo para medir la tasa de expansión del universo con una precisión sin precedentes y determinar, al fin, si nos encontramos en un universo abierto, cerrado o plano. Para sorpresa de todo el mundo, ambos equipos llegaron a la conclusión de que la expansión de nuestro universo se está acelerando.

El asombro en la comunidad científica fue mayúsculo. Primero, porque reivindicaba la idea que Einstein había considerado una vez como el mayor error de su vida: la existencia de un término extra en las ecuaciones de la relatividad general que generaba una fuerza repulsiva. A este término se le suele llamar la *constante cosmológica* y todo el mundo, incluyendo Einstein, esperaba que fuese exactamente cero. Segundo, porque nadie sabía qué tipo de proceso podía dar lugar a una constante cosmológica como la observada, con un valor muy pequeño pero mayor que cero.

Recordemos que el modelo estándar predice que nuestro vacío debe tener energía. Uno puede entonces calcular esa energía de vacío y comparar el resultado de nuestros cálculos con el medido por los dos experimentos mencionados anteriormente. El resultado es desastroso: el valor calculado es 10^{120} veces mayor que el observado experimentalmente. Recordemos que un valor

DEDUCIENDO EL PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE

El principio de incertidumbre nos dice que la posición y el momento de una partícula no pueden ser conocidos a la vez con precisión infinita. Esto se debe a que las partículas en mecánica cuántica son *ondas de probabilidad*: cada partícula tiene una onda asociada que podemos usar para calcular la probabilidad de que se encuentre en un lugar determinado. La probabilidad viene dada por la *amplitud* de la onda al cuadrado: como se ve en la figura 1, la amplitud es la mayor distancia posible entre el centro de la onda y su parte más alta. Una propiedad importante de las ondas es que se *difractan*: al pasar por una apertura de un tamaño comparable a su longitud de onda, que es la distancia entre dos picos, la onda se esparce en todas direcciones (figura 2). Cuanto menor es la apertura, más se dispersa la onda. Esto es lo que hace posible oír a una persona que nos habla a través de un orificio, por ejemplo. De la misma forma, la onda asociada a una partícula también se difracta al pasar por una apertura. Veamos lo que eso implica.

Esquivos movimientos de un electrón

Supongamos que queremos medir la posición de un electrón que se mueve en línea recta. En este caso conocemos muy bien su momento p , ya que sabemos exactamente hacia dónde se está moviendo. Sin embargo, no tenemos ni idea de dónde está. Para averiguarlo, obligamos al electrón a pasar por una apertura en una pared: si cruza al otro lado, sabemos que el electrón estaba en algún lugar de esa rendija. Cuanto mayor sea la rendija, mayor será la incertidumbre en la posición del electrón: por lo tanto, podemos asumir que la incertidumbre en la posición Δx es más o menos igual al tamaño de la rendija, como puede apreciarse en la figura 2. Al pasar por la rendija, la situación cambia: la onda se difracta, de forma que hay varias direcciones en las que el electrón puede moverse. En particular, es especialmente probable que el electrón se encuentre en algún lugar del triángulo que se muestra en la figura, ya que es allí donde la onda tiene la máxima amplitud. Así pues, la anchura del triángulo es proporcional a la incertidumbre en el momento del electrón. Además, sabemos que una onda se difracta más cuanto menor es la apertura, lo que significa que la incertidumbre en el momento crece si la incertidumbre en la posición disminuye. Matemáticamente lo podemos expresar así:

$$\Delta p \approx \frac{1}{\Delta x}.$$

O bien:

$$\Delta p \Delta x \geq \hbar,$$

donde \hbar es una constante, que resulta ser la constante de Planck dividida por 4π . Esta es la formulación matemática del principio de incertidumbre.

FIG. 1

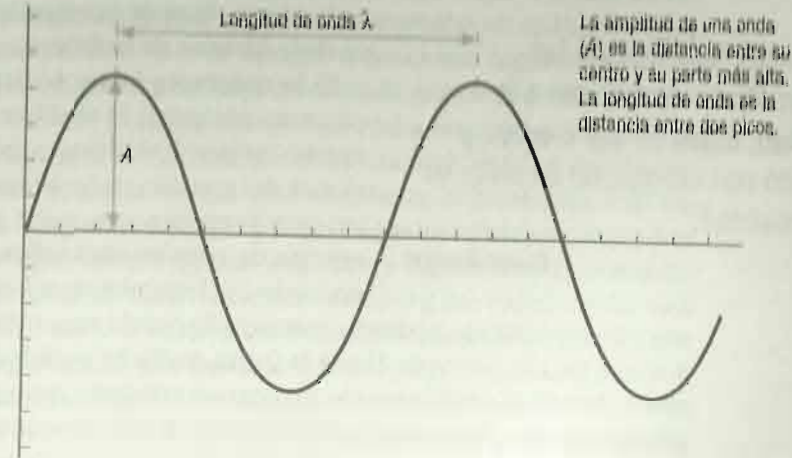
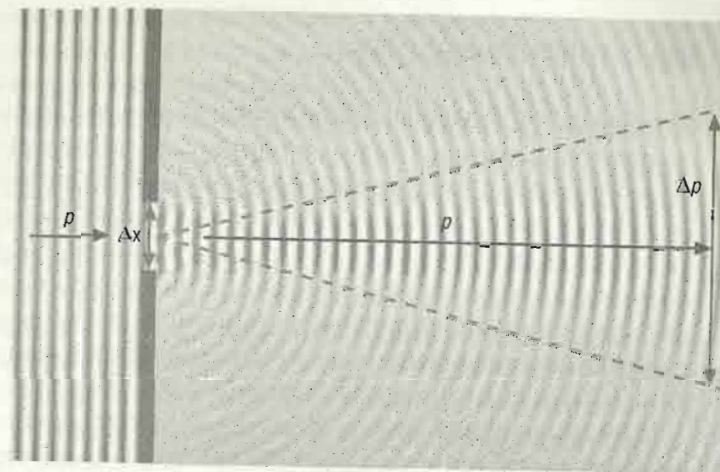


FIG. 2



Difracción de una partícula a través de una apertura. El tamaño de la apertura es dos veces la incertidumbre en la posición; la anchura del primer máximo nos da la proporción entre el momento de la partícula y su incertidumbre.

de 10^{61} es mayor que la proporción entre el tamaño del universo y un núcleo atómico y que, por cada potencia que añadimos, el resultado se multiplica por diez. Esta discrepancia ha sido calificada como «la peor predicción teórica de la historia de la física».

En cuanto las leyes de las matemáticas se refieren a la realidad, dejan de ser ciertas, y cuando son ciertas, no se refieren a la realidad.

ALBERT EINSTEIN

Si la constante cosmológica fuera exactamente cero, el problema sería mucho menor: hay algunas modificaciones del modelo estándar que arrojan precisamente ese valor para la energía de nuestro vacío. Sin embargo, no lo es. Tenemos un número que

es extremadamente pequeño comparado con lo esperable, pero a su vez mayor que cero. Hasta la fecha, nadie ha podido dar con una solución al problema sin invocar el principio antrópico: la idea de que la constante cosmológica es la que es porque, si no lo fuera, no estaríamos aquí para verlo.

Una coincidencia sospechosa

El valor de la constante cosmológica es un caso flagrante de coincidencia cósmica. Si hubiera tenido el valor predicho por la teoría, nuestro universo se hubiera expandido tan rápido que no habría habido tiempo para formar ningún tipo de estructura compleja. Si hubiera sido mucho menor, nuestro universo sería cerrado y, de nuevo, habría implosionado demasiado rápido para dar lugar a la vida. Como en los ejemplos de Rees, se trata de una coincidencia sospechosa: la constante cosmológica resulta tener uno de los pocos valores que resultan compatibles con la vida.

El estadounidense Steven Weinberg (n. 1933), premio Nobel de Física en 1979, propuso en 1987 un argumento según el cual la constante cosmológica debería tener un valor pequeño pero no nulo. Lo hizo una década antes de que se descubriese su valor actual y cuando casi todo el mundo pensaba que tenía que ser cero. El argumento de Weinberg era científicamente poco ortodoxo: hacía uso de algo llamado el «principio antrópico». La

idea de Weinberg era que nuestra propia existencia condiciona el universo que observamos. Weinberg imaginaba un universo donde la constante cosmológica tenía diferentes valores en diferentes regiones del espacio y se preguntaba en cuáles de ellas podríamos existir. Eso le llevaba a descartar lugares donde la constante cosmológica fuera demasiado grande o demasiado pequeña. Weinberg también se pronunciaba en contra de un valor de exactamente cero, dada la minúscula probabilidad de que eso sucediese. A pesar de que una constante cosmológica con un valor de exactamente cero es improbable en extremo, ya que hay muchos más valores que no son cero y siguen siendo compatibles con nuestras observaciones. Weinberg fue capaz de dar una estimación para el valor de la constante cosmológica basándose en argumentos que muchos físicos considerarían filosóficos. Sorprendentemente, estos argumentos dieron resultados mucho mejores que los de la aplicación de las mejores teorías disponibles en el momento. En 1995, dos años antes de la confirmación de la expansión acelerada del universo, el físico ucraniano Alexander Vilenkin (n. 1949) refinó el modelo de Weinberg, prediciendo un valor máximo para la constante cosmológica solo tres veces mayor del observado.

El razonamiento de Weinberg es un ejemplo de lo que se suele llamar *razonamiento antrópico*. La idea básica es usar el hecho de que existimos como base para hacer predicciones o explicar algunas de las características del universo. Hay distintos tipos de razonamiento antrópico, que van desde lo obvio hasta lo polémico. Por ejemplo, algunos físicos creen que las constantes del universo son las que son para que exista la vida inteligente, lo que revela la creencia en una especie de causa final que diseña las leyes aposta para que surja la vida. Este tipo de razonamiento antrópico es visto con recelo por una gran mayoría de físicos, que suelen optar por versiones con menos implicaciones religiosas, como la de Weinberg.

En general, el razonamiento antrópico es una medida de último recurso. Sin embargo, en algunas situaciones no queda más remedio que recurrir a él. Normalmente, este tipo de razonamiento se aplica cuando una teoría tiene ciertos parámetros que

no es posible predecir y que, en principio, podrían tomar cualquier valor. Dado que el modelo estándar tiene un gran número de estos, los razonamientos antrópicos son a veces utilizados para explicar algunas de sus características.

El valor de la constante cosmológica es el problema más acuciante que, a día de hoy, no puede solucionarse con solo física, pero no es el único. Entre todos ellos destaca el *problema de la jerarquía*, que trata sobre la diferencia entre la masa de ciertas partículas y la que cabría esperar que tuvieran de forma natural.

EL PROBLEMA DE LA JERARQUÍA

En julio de 2012, el acelerador de partículas LHC (*Large Hadron Collider*, ubicado en las instalaciones de la Organización Europea para la Investigación Nuclear, el CERN, cerca de Ginebra) anunció el descubrimiento del *bosón de Higgs*, una partícula subatómica. Se trataba de la última pieza necesaria para completar el modelo estándar, la teoría que gobierna las interacciones del mundo microscópico. El bosón de Higgs tiene un papel especial en la teoría: es el responsable de que las partículas elementales tengan masa.

La teoría de la relatividad dice que ningún objeto puede viajar más rápido que la luz. Además, solo permite a los cuerpos sin masa viajar a esa velocidad, mientras que el resto únicamente podrán aproximarse a ella, pero sin alcanzarla jamás. La razón para ello es que acelerar un cuerpo masivo cuesta más y más energía a medida que uno se acerca a la velocidad de la luz: es mucho más difícil acelerar una partícula desde el 99,9998% de la velocidad de la luz al 99,9999% que hacerlo desde cero hasta un 50% de esa velocidad.

La idea de que solo las partículas sin masa pueden viajar a la velocidad de la luz puede usarse a la inversa: si una partícula está viajando a la velocidad de la luz, significa que no tiene masa; de la misma forma, si viaja más lento, tiene que ser masiva.

Las partículas pueden ganar masa a través del bosón de Higgs de dos formas distintas: por un lado, los electrones lo hacen a

través de la interacción con él, lo que crea el efecto en zigzag que hace que parezcan moverse más lentamente que la luz y que, por lo tanto, tengan masa. Por otro, partículas como las W, que son una especie de fotón con carga y masa, lo hacen a base de absorber parte del bosón de Higgs.

Irónicamente, es el valor de la masa del bosón de Higgs el que supone un problema: como con la constante cosmológica, la teoría predice que el Higgs tendría que tener o bien una masa enorme o bien ninguna masa en absoluto, mientras que resulta tener una masa relativamente pequeña, pero no cero. Para entender el porqué de esas predicciones, nos fijaremos primero en la masa de un electrón.

En su teoría de la relatividad especial, Einstein demostró que masa y energía eran diferentes aspectos de un mismo fenómeno. En particular, la masa de una partícula podía ser convertida en energía y viceversa mediante la famosa fórmula $E=mc^2$. En nuestra vida cotidiana las energías de las que disponemos son mucho menores que nuestra masa, así que no vemos las consecuencias de este fenómeno. Sin embargo, las partículas elementales son tan ligeras que, en muchos casos, su energía es comparable a su masa. De hecho, partículas compuestas como el protón deben la mayor parte de su masa a su energía.

Una partícula puede tener dos tipos de energía: cinética o potencial. La energía cinética es la que viene asociada al movimiento: cuanto más rápido se mueve una partícula, más energía cinética tiene. Por otro lado, la energía potencial es algo más abstracto. Se trata de la energía que una partícula o sistema de partículas tiene debido a su posición.

Un ejemplo sencillo de energía potencial es el de una goma elástica. Cuando la estiramos le estamos dando energía, que queda almacenada en la goma. Podemos ver que la goma ahora tiene energía porque, cuando la soltamos, sale disparada: su energía potencial se ha convertido en cinética. De forma similar, dos partículas con cargas idénticas tienen energía potencial, ya que cuesta trabajo acercarlas. Cuanto más las aproximamos, más energía tienen: de nuevo lo podremos comprobar porque, si las soltamos, ambas partículas saldrán disparadas

con gran velocidad, al transformar a su vez su energía potencial en cinética.

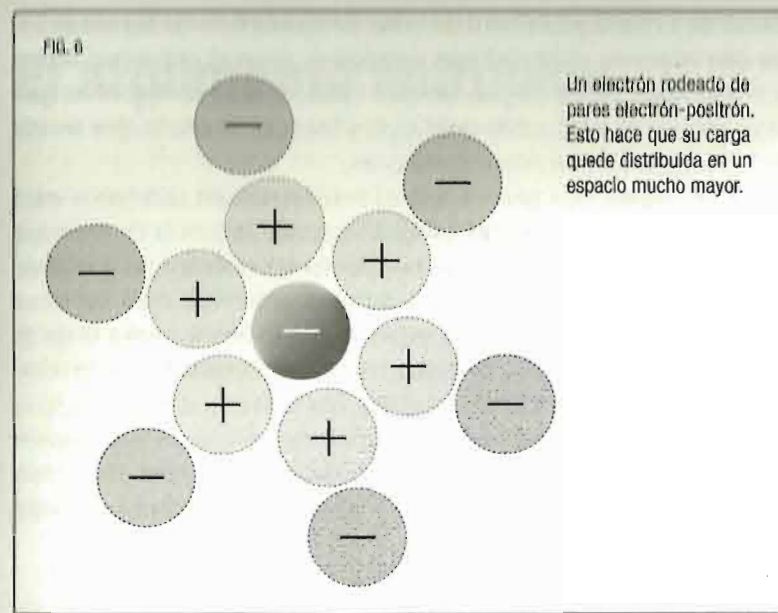
Dado que masa y energía son dos caras de la misma moneda, dos electrones muy próximos el uno al otro tendrán más masa que por separado. Llamamos a la masa que tiene un electrón aislado su *masa en reposo*. La energía potencial que los dos electrones ganan al estar en proximidad se añade a su masa en reposo. Si los juntamos lo suficiente, los electrones podrían llegar a tener más masa en forma de energía que en forma de su masa en reposo.

Este simple razonamiento pronto crea problemas si consideramos un electrón por sí mismo. Dado que el electrón tiene una cierta carga distribuida en un espacio reducido, podemos concluir que debe poseer una cierta energía potencial, porque la carga se tiene que estar repeliendo a sí misma. Así pues, podemos separar la masa del electrón en dos partes: por un lado, la masa que tendría si no tuviera carga, a la que llamaremos *masa desnuda*; por otro, la que gana a través de la energía potencial asociada a su carga.

Pero el electrón es una «partícula puntual»: no tiene volumen. Eso significa que su carga ocupa un volumen infinitamente pequeño, lo que a su vez quiere decir que está infinitamente cerca de sí misma. Recordemos que juntar dos electrones se vuelve más difícil cuanto más cerca están: de hecho, se vuelve infinitamente difícil a una distancia nula. Eso significa que el electrón debería poseer una cantidad infinita de energía y, por lo tanto, de masa.

Por supuesto, nadie se toma en serio esta predicción. Por un lado, esto solo indica que nuestra suposición de que el electrón es una partícula puntual debe de estar equivocada y que tenemos que sustituirla por otra, que vendrá dada por una mejor teoría que aún desconocemos. Por otro, en el caso del electrón se produce un efecto casi mágico de apantallamiento que elimina el problema por completo: debido al principio de incertidumbre se crean pares electrón-positrón (la antipartícula del electrón) a su alrededor que distribuyen la carga sobre un volumen mucho mayor, dando una energía y una masa finitas (figura 6).

Por desgracia, en el caso del bosón de Higgs este efecto no se da, lo que significa que debería tener una masa muy elevada;



aproximadamente tan elevada como la energía a la que creemos que el modelo estándar deja de funcionar. Se trata de una discrepancia enorme con la masa que se ha medido: unas 10^{14} veces mayor. Como en el problema de la constante cosmológica, lo natural sería que, o bien el bosón de Higgs no tuviera masa, ya que podríamos invocar alguna cancelación mágica de todas las energías, o que tuviera una masa enorme, como la que nos dan los cálculos de nuestra teoría. Lo que no parece que tenga sentido es esa masa intermedia que muestran los experimentos.

RAZONAMIENTO FÍSICO CONTRA RAZONAMIENTO ANTRÓPICO

Al contrario que con la constante cosmológica, hay varias explicaciones que pueden dar cuenta del problema de la jerarquía. Por ejemplo, una modificación del modelo estándar llamada *supersimetría* podría explicar por qué el bosón de Higgs tiene una masa mucho menor de la esperada. Se puede considerar el pro-

blema de la jerarquía como un caso de ajuste fino de las constantes que requiere del principio antrópico, pero el consenso entre la comunidad física es que, en este caso, lo más probable es que haya una explicación más profunda y basada en una mejor teoría de las interacciones entre partículas.

Sin embargo, hoy parece que el razonamiento antrópico está aquí para quedarse: nuevas predicciones de la teoría de cuerdas sugieren que nuestro universo podría no ser el único, lo que abre la puerta a razonar de forma antrópica sobre en cuál de ellos nos hallamos. Problemas que parecen imposibles, como el de la constante cosmológica, desaparecen al considerar una combinación entre la posibilidad de múltiples universos y el principio antrópico. Al final, nos vemos con una disyuntiva: o aceptamos que algunas características del universo simplemente son como son, o planteamos una explicación basada en el papel que juega nuestra propia existencia.

El argumento antrópico

Ha habido muchos intentos de dar cuenta del ajuste fino de algunas de las constantes físicas. Las explicaciones que parten de la premisa de que nuestra propia existencia tiene algo que ver han sido bautizados como *principios antrópicos*. Los hay diversos y con distintos grados de plausibilidad.

Las leyes de la física parecen haber sido diseñadas para permitir la aparición de observadores inteligentes. Coincidencias como el valor de la constante cosmológica necesitan, en opinión de muchos, algún tipo de explicación. Por supuesto, algunos físicos consideran que eso no hace ninguna falta: el universo es como es y preguntarse por qué no tiene sentido. Otros consideran que invocar nuestra existencia para dar cuenta de las características del universo es parecido a decir que la Tierra tiene oxígeno porque lo necesitamos para vivir: no aclara nada. En su lugar, un biólogo preferiría una explicación causal: el oxígeno es generado por organismos fotosintéticos que capturan el CO_2 de la atmósfera y emiten oxígeno.

Sin embargo, en algunas ocasiones no tenemos una explicación causal. Cuando eso sucede, uno puede continuar creyendo que la ciencia la encontrará tarde o temprano; también puede inclinarse por una explicación filosófica que, aunque menos satisfactoria, dé cuenta de lo observado.

El *principio antrópico* es una explicación de este último tipo. Pocos lo considerarían ciencia, ya que no es una teoría científica sino más bien un modo de razonar que se complementa bien con

ciertos modelos físicos. Es un añadido filosófico y matemático a nuestra visión del mundo que nos ayuda a resolver paradojas aparentes sobre el universo que observamos.

La primera formulación explícita del principio antrópico fue dada por el físico teórico australiano Brandon Carter (n. 1942) en 1974. Entonces aún coleaba la idea de que el universo tenía que

ser estático o, en otras palabras, homogéneo tanto en el espacio como en el tiempo: es decir, el universo tenía que tener el mismo aspecto en cualquier lugar y momento en el que fuera observado. Hacía menos de una década que se había descubierto el fondo cósmico de microondas, que había dado al traste con esa teoría al demostrar que el universo pasó por una fase muy densa y caliente, lo que indicaba que tenía que haber empezado con una gran explosión o *Big Bang*.

Sin embargo, algunos físicos se resistían a la nueva teoría del Big Bang porque, según argumentaban, ponía a la humanidad en una situación privilegiada: las condiciones del universo habrían sido adversas a la vida durante la mayor parte de su historia. ¿No era mucha coincidencia que nos encontrásemos precisamente en la época en la que las condiciones eran favorables?

Carter argumentó que no había coincidencia alguna: el principio de mediocridad no siempre funciona. Uno no se encuentra en una región aleatoria entre todas las posibles: se encuentra en una región aleatoria entre todas aquellas en las que podría existir. Los humanos, por el solo hecho de existir, estamos en una posición especial.

La idea de Carter es difícil de rebatir y es considerada tautológica de forma unánime. La bautizó como el *principio antrópico débil* aunque, como se verá, otros físicos han usado el mismo nombre para referirse a algo sustancialmente distinto. Carter fue, sin embargo, más allá y propuso su *principio antrópico fuerte*, que definió de la siguiente manera:

FRANK TIPLER

El universo (y, por lo tanto, los parámetros fundamentales de los que depende) tiene que ser tal que admita la creación de observadores en algún momento.

Tal y como apunta el filósofo sueco Nick Boström (n. 1973), la formulación del principio antrópico fuerte es algo vaga y depende de cómo se interprete el «tiene que». Si uno lo entiende como queriendo decir que es necesario porque sabemos que existimos, entonces hay pocas dudas de que se trata, de nuevo, de una tautología, aunque quizá formulada de forma algo más contundente que el principio antrópico débil. Si uno interpreta que significa que hay algo que fuerza al universo a crear observadores, entonces estamos delante de una proposición metafísica, no científica, a la que no hay forma de verificar. Como se verá, la mayor parte de las objeciones al principio antrópico se refieren a esta interpretación del principio antrópico fuerte, popularizada por el físico y escritor estadounidense Frank Tipler (n. 1947) y el matemático británico John. D. Barrow (n. 1952) en su libro *El principio antrópico cosmológico*.

EL PRINCIPIO ANTRÓPICO COSMOLÓGICO

Precisamente con ese libro empezó la mala prensa del principio antrópico. En él, sus dos autores defendían una hipótesis polémica: las leyes del universo tienen que ser tales que permitan la vida. Es decir: la vida es la causa de las leyes del universo y no al revés. Tipler y Barrow volvían a introducir en la ciencia el concepto aristotélico de *causa final*.

Aristóteles distinguía entre diferentes tipos de causas. La *causa eficiente* era aquella que producía un efecto: por ejemplo, el motor de un coche es su causa eficiente. Esto es parecido al concepto de causa y efecto que tenemos hoy en día. Pero Aristóteles hablaba también de algo llamado la *causa final*. Esta última se distinguía de las primeras porque su causa no se hallaba en el pasado, sino en el futuro: una piedra caía para poder acercarse al centro de la Tierra; una semilla germinaba para

transformarse en una planta. En lugar de un porqué, se tenía un para qué.

Hoy en día la inmensa mayoría de científicos ven las causas finales con recelo. Nada en el universo sucede para que otra cosa ocurra en el futuro, sino que hechos actuales se dan a causa de hechos pasados. Sugerir lo contrario es casi anatema, ya que tiene unas connotaciones religiosas difíciles de ignorar. Sin embargo, Tipler y Barrow llegaron a sugerir precisamente eso: que tiene que existir al menos un universo que dé lugar a la vida inteligente.

En su libro, Tipler y Barrow acuñaron dos nuevas formulaciones para los principios antrópicos débil y fuerte, que llevaban al extremo las ideas de Carter. En particular, definían el principio antrópico débil de la siguiente manera:

Los valores observados de las cantidades físicas y cosmológicas no son igualmente probables, sino que están restringidos por el requisito de que exista vida, que pueda evolucionar, basada en el carbono, así como por el requisito de que el universo sea lo suficientemente viejo para haberlo hecho.

Como se ve, su formulación dista mucho de la de Carter, que se limitaba a hablar de la presencia de observadores y que no entraba a discutir en ningún momento las constantes físicas del universo. El principio antrópico «débil» de Tipler y Barrow es más próximo al fuerte de Carter.

Otra diferencia clave es la mención de la vida basada en el carbono: Carter se limitaba a hablar de observadores. ¿Por qué necesitamos seres vivos basados en el carbono? ¿No serían también conscientes de existir inteligencias de silicio? Como menciona Boström en su crítica a Barrow y Tipler, esa pequeña modificación hace que el principio antrópico débil pierda su estatus de tautología, lo que significa que pasa a ser una afirmación metafísica no demostrable. El principio afirma que el universo solo puede ser observado si contiene observadores, lo cual es obvio. Que un universo solo pueda ser observado si contiene humanos es mucho menos plausible.

Tipler y Barrow también reformularon el principio antrópico fuerte. Su versión era la siguiente:

El universo debe tener las propiedades que le permitan desarrollar vida en algún punto de su evolución.

De forma parecida al de Carter, el principio antrópico fuerte de Tipler y Barrow es ambiguo debido a la presencia de un «debe» que puede tener distintos significados. Sin embargo, difiere del de Carter en un punto esencial: se refiere a la vida. Esto puede parecer una diferencia nimia, pero no lo es. Por un lado, hay seres vivos que no son conscientes y que a duras penas podrían ser considerados como observadores: por ejemplo, los árboles o los animales unicelulares. Por otro, podrían existir observadores no vivos, como una inteligencia artificial. En este sentido, de nuevo Tipler y Barrow añaden confusión a una formulación más precisa de Carter.

En su libro, Tipler y Barrow discuten tres interpretaciones del principio antrópico fuerte. Hoy en día, ninguna de ellas es tomada en serio por científico alguno, con la posible excepción de Tipler y Barrow. Son las siguientes:

1. Hay un universo posible diseñado con el objetivo de generar y mantener observadores.
2. Se necesita un conjunto de otros universos para que exista el nuestro.
3. Los observadores son necesarios para que el universo exista.

A pesar de que el primer punto parece haber sido incluido como una mera posibilidad que no hay que tomar muy en serio, trabajos posteriores de Tipler muestran que es su hipótesis predilecta: en su libro de 1994 *La física de la inmortalidad: La cosmología moderna y su relación con Dios y la resurrección de los muertos*, Tipler argumenta que las leyes de la física demuestran la existencia de Dios y la inmortalidad del alma. Es fácil ver

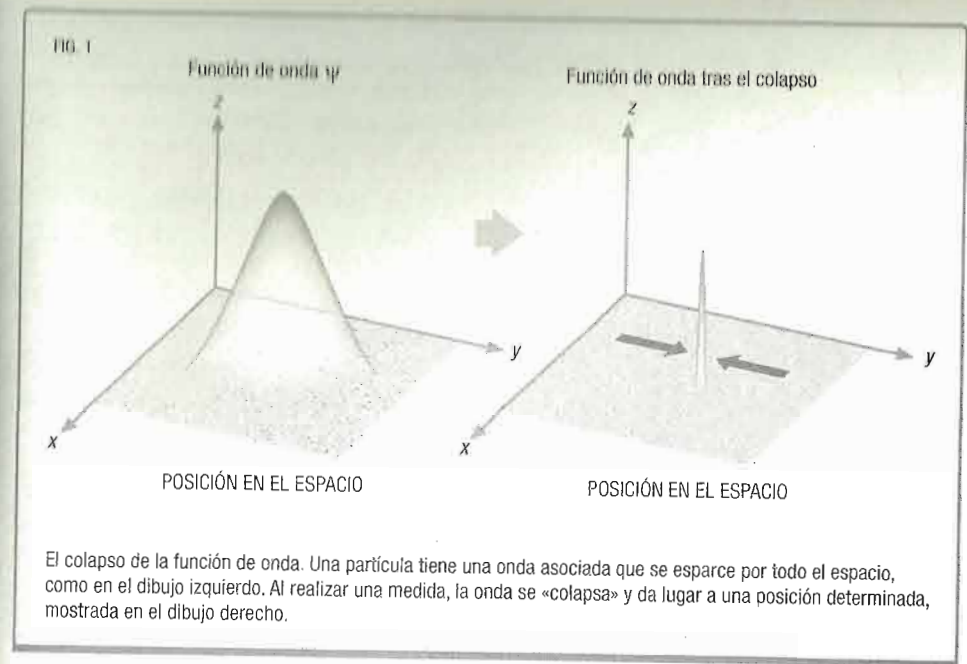
cómo esa visión casa perfectamente con la idea de que el universo ha sido diseñado para generar observadores. Por supuesto, la inmensa mayoría de físicos opinan que el libro de Tipler es un fraude científico y que no hay nada en las leyes de la física que se pueda usar para demostrar tal cosa. Sin embargo, nos da una idea de por qué Tipler y Barrow alteraron la formulación original del principio antrópico de una forma sutil que estaba más de acuerdo con su idea del mundo.

La segunda opción se basa en un malentendido. Es cierto que si existe un único universo, entonces el principio antrópico fuerte no tiene capacidad explicativa alguna, siendo una mera perogrullada: el universo permite nuestra existencia porque existimos. Sin embargo, si hubiese una multiplicidad de universos, el principio antrópico podría leerse como: «solo podemos ser conscientes de existir en aquellos universos que permiten la vida». En este caso, si nuestra teoría física predice una multiplicidad de universos, podemos usar el principio antrópico para explicar por qué nos hallamos en uno que acomode la vida. Tipler y Barrow malinterpretan esta idea, entendiendo que nuestro universo solo puede existir si lo hace también un conjunto de otros universos. Esto es claramente absurdo: no hay nada en las leyes de la física que impida la existencia de un solo universo.

La tercera opción es quizá la más interesante, aunque también es difícil de defender. Se basa en una idea del físico teórico estadounidense John Archibald Wheeler (1911-2008) quien propuso la famosa frase «*it from bit*»: es decir, la realidad no es más que información.

El principio antrópico participativo

Como se ha visto, en la mecánica cuántica las partículas tienen una onda de probabilidad asociada, que se esparce como una onda normal y corriente hasta que se mide la posición de la partícula. En ese momento, la partícula pasa a estar en una posición determinada y la onda «colapsa»: pasa a ocupar el lugar donde se ha encontrado la partícula (figura 1). Una vez realizada la me-



dición, la onda vuelve a esparcirse normalmente, lo que continuará haciendo hasta una nueva medida.

Hay varias interpretaciones sobre lo que realmente sucede al medir una partícula y, en especial, sobre si la onda que esta lleva asociada es real o un simple artificio matemático. Una de las más populares es la llamada «interpretación de Copenhague», que afirma que lo único real son los resultados de las medidas, mientras que la existencia o no de la onda cuando esta no es observada es una cuestión no científica. En otras palabras: la ciencia se ocupa de los resultados de experimentos. El resto es filosofía.

La interpretación de Copenhague se suele considerar *antirrealista* en el sentido de que niega la existencia de la función de onda y, por consiguiente, de una realidad única y determinada cuando esta no se mide. También puede considerarse *subjetivista*, porque parece dar más peso a lo que percibe un sujeto u observador que a la realidad en la que este se encuentra.

EL PROCESO DE MEDIDA CUÁNTICA

La interpretación más moderna de la mecánica cuántica considera que una medida es un caso especial de *entrelazamiento cuántico*, seguido por algo llamado *decoherencia*.

Influencia mutua

Dos sistemas cuánticos se dice que están *entrelazados* cuando el resultado de realizar una medida en uno de ellos determina el resultado en el otro. Pongamos por ejemplo el espín, que es una medida de la rotación intrínseca de la partícula. Normalmente, asignamos al sentido de la rotación de esa partícula una dirección arbitraria a la que llamamos «arriba» o «abajo». Si dos partículas tienen el espín en direcciones opuestas, decimos que su espín total es cero. Consideremos ahora un sistema de dos partículas, de las cuales sabemos que el espín total es cero, pero nada más. Al medir el espín de una de esas partículas, el de la otra queda determinado: si la primera tiene espín arriba, la segunda tendrá espín abajo y viceversa, como se muestra en la figura 1, lo que es necesario para que el espín total sea cero. Eso se produce aunque ambas partículas se hallen a kilómetros de distancia. Cuando realizamos una medición, el sistema cuántico que estamos midiendo queda entrelazado con nuestro aparato experimental. Para cada resultado posible, existe un estado distinto de nuestro detector: por ejemplo, si disparamos electrones contra una pantalla, cada posición donde pueda impactar el electrón tendrá asociada una configuración de la pantalla. Decimos que el estado del electrón y de la pantalla están entrelazados.

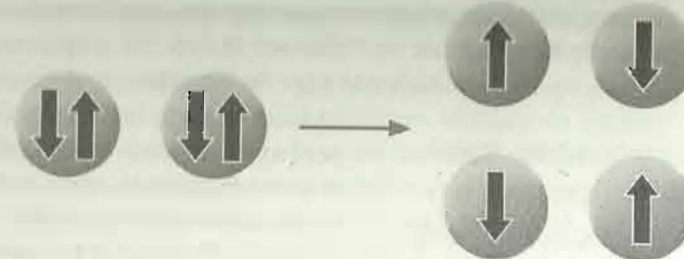
Cuestión de similitud

La segunda parte de la medida y lo que la distingue de un simple entrelazamiento es algo llamado *decoherencia*. La decoherencia se basa en la idea de que, para que puedan interactuar, dos ondas tienen que ser muy similares. Si no lo son, no puede darse interferencia alguna: es como si la otra onda no existiese (figura 2). Los sistemas cuánticos se comportan como si fueran ondas: en particular, son *ondas de probabilidad*, es decir, una onda que nos da la probabilidad de encontrar nuestro sistema en un estado determinado. Cada onda suele tener distintos componentes, uno para cada posibilidad en la que se pueda encontrar nuestro sistema. Cuando esas componentes son muy similares, las distintas partes de la onda interactúan y dan lugar a los clásicos fenómenos cuánticos, como la interferencia. Sin embargo, si esas partes son muy distintas, dejan de poder interferir: a todos los efectos son invisibles la una para la otra. Cuando eso sucede, decimos que se ha producido la decoherencia. Dado que dos observaciones macroscópicas difieren en miles de millones de partículas, la decoherencia está asegurada siempre que midamos algo con un aparato de laboratorio: las dos funciones de onda serán muy distintas, dado que las situaciones macroscópicas a las que dan lugar también lo son.

Dos procesos para un mismo fin

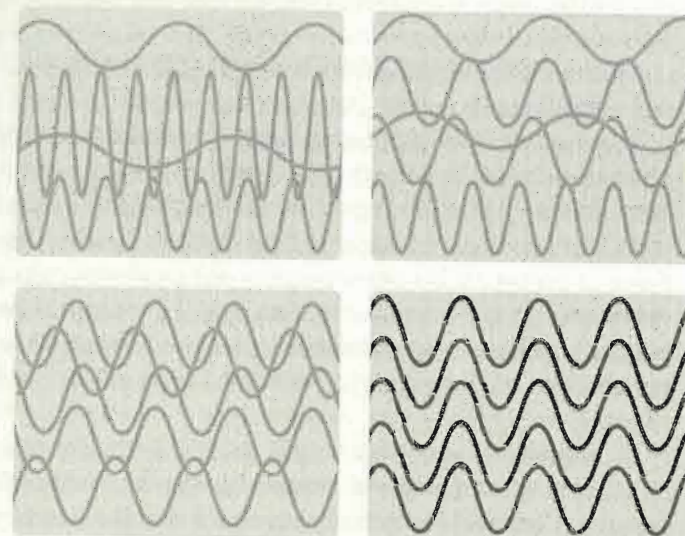
En resumen, cada vez que realizamos una medida cuántica, estamos realizando dos procesos: en primer lugar, entrelazamos nuestro aparato de medición con el sistema que estamos midiendo; en segundo lugar, se produce la decoherencia debido a la diferencia sustancial entre los diferentes estados de nuestro aparato de medida.

FIG. 1



Entrelazamiento antes y después de la medida. Antes de la medida, ambas partículas pueden encontrarse en un estado de espín arriba o abajo; después de la medida, si la primera partícula tiene espín arriba, la segunda tiene que tenerlo abajo y viceversa.

FIG. 2



Dos ondas son coherentes cuando tienen una longitud de onda similar y están sincronizadas temporalmente. Todas las figuras menos la inferior derecha representan ondas no coherentes, ya que o bien difieren en longitud de onda o no están sincronizadas. Cuando dos funciones de onda dejan de ser coherentes se produce la decoherencia.

Wheeler se planteaba lo siguiente: dado que la realidad parece estar supeditada a un conjunto de medidas ¿es posible que la realidad fundamental sea la información sobre esas medidas? Es decir: ¿podría ser que la información generase el universo físico y no a la inversa?

Tipler y Barrow llevan la idea de Wheeler un poco más allá y, basándose en la interpretación de Copenhague, afirman que es posible que el universo simplemente no exista si no es observado, parecido a lo que proponía el obispo y filósofo irlandés George Berkeley (1685-1753) con su famoso «ser es ser percibido». Dado que la idea de Copenhague no se pronuncia sobre la existencia de una realidad externa cuando no es observada, parece legítimo concluir que esa realidad no existe, a no ser que se haga una observación. Eso explicaría por qué las constantes de la física son las adecuadas para la vida: el universo nos necesita para existir. Sin observadores, no hay universo.

El principio antrópico participativo tiene varios problemas. El primero es que Copenhague no dice que no exista una realidad si no es observada, sino que esta realidad existe en una superposición de todos los estados posibles hasta que es observada. Así pues, la presencia de observadores obliga al universo a escoger un estado, pero no causa su existencia. Adoptando una posición aún más radical, se podría decir que Copenhague no se pronuncia sobre la existencia de la realidad, lo que no es lo mismo que negarla.

El segundo es que, hoy en día, la definición de «observador» es mucho más sutil que el simple «ser humano que mira al universo». Hoy sabemos que el proceso al que llamamos «observación» es en realidad algo llamado «entrelazamiento», que sucede cuando las propiedades macroscópicas de un sistema, como un aparato de medida, dependen fuertemente de un evento microscópico, como la posición de un electrón. Es decir: una «observación» es un proceso que relaciona las propiedades de un sistema pequeño con uno grande, pero no tiene por qué implicar

observador consciente alguno. Así pues, el principio antrópico participativo no parece tener ningún fundamento.

En resumen, los principios antrópicos de Barrow y Tipler tienen un sesgo dado por las opiniones metafísicas de los autores y no se corresponden con la formulación inicial de Carter, que se basaba en el simple hecho de que los observadores solo pueden existir en ciertas regiones del universo. El libro de Barrow y Tipler fue, sin embargo, tan influyente que ha determinado lo que muchos miembros de la comunidad científica piensan del principio antrópico: que en su origen no era más que una tautología. Dado que la formulación de Carter es mucho más científica y no está basada en afirmaciones metafísicas, en lo que sigue se tomará su formulación como la base para hablar del razonamiento antrópico y se ignorará la formulación de Tipler y Barrow.

EL PRINCIPIO ANTRÓPICO COMO SESGO DE SELECCIÓN

Según el filósofo Nick Boström, el principio antrópico no es algo novedoso, sino un caso particular de algo llamado un «sesgo de selección». Los sesgos de selección se dan cuando un individuo llega a conclusiones erróneas al no tener en cuenta su propio papel como observador.

Un ejemplo típico de sesgo de selección es el de un pescador en un lago. El pescador lanza su red al agua y se dedica a pescar durante todo el día; tras horas de trabajo, se pone a medir los peces que ha pescado y observa que todos ellos son mayores de quince centímetros. De ahí, llega a la conclusión de que en el lago todos los peces tienen al menos ese tamaño.

Por supuesto, el pescador no repara en el hecho de que los agujeros en su red de pescar tienen un diámetro de quince centímetros, lo que hace imposible pescar un pez menor. Su forma de seleccionar los especímenes hace que llegue a una conclusión equivocada sobre el lago. Para evitar llegar a ese tipo de resultados falaces, el pescador tendría que ser consciente del método que usa para seleccionar los peces.

Con el fin de comprender mejor esta realidad, hay que tener en cuenta otras dimensiones de una realidad más amplia.

JOHN ARCHIBALD WHEELER

Los seres humanos caemos con frecuencia en sesgos de selección. Por ejemplo, tendemos a asociar correr riesgos con el éxito, porque vemos que una gran mayoría de los personajes públicos que conocemos han llegado a su posición tomando decisiones arriesgadas. Sin embargo, no vemos a los millones que actuaron de la misma manera pero no les salió bien, porque esa gente nunca se hace famosa. Eso nos lleva a concluir que las conductas arriesgadas son una garantía de éxito cuando, en general, se trata de una estrategia económicamente nefasta.

Para Nick Boström, la única forma de evitar que nuestra posición como observadores tenga un impacto negativo en nuestros resultados es tomar como premisa lo que da en llamar el *principio de automuestreo*. Este se puede enunciar de la siguiente manera:

Uno debería razonar partiendo de la premisa de que es un observador elegido aleatoriamente entre todos los observadores de su clase.

Veamos qué significa esto exactamente. Supongamos que el universo consiste en una mazmorra con cien celdas, de las cuales noventa están pintadas de azul y diez de rojo. Esto es algo que saben todos los habitantes de la cárcel. Ahora supongamos que nos encontramos en una de las celdas, con los ojos vendados. ¿Cuál es la probabilidad de que nos encontremos en una celda azul? Sin más información, tenemos que concluir que tiene que ser un noventa por ciento. En este caso, estamos asumiendo que somos un observador elegido aleatoriamente entre todos los que se encuentran en la mazmorra: dado que un noventa por ciento de esos observadores se encontrarán en celdas azules, parece lógico concluir que ese porcentaje se aplicará también a nosotros.

El ejemplo de la mazmorra es bastante obvio, pero en nuestro día a día se dan casos en los que no utilizar el principio de automuestreo nos lleva a conclusiones erróneas. Un ejemplo particularmente interesante es el tráfico.

La gran mayoría de los conductores han experimentado la frustrante sensación de haber escogido el carril equivocado cuando hay retenciones. Los coches del carril de al lado pare-

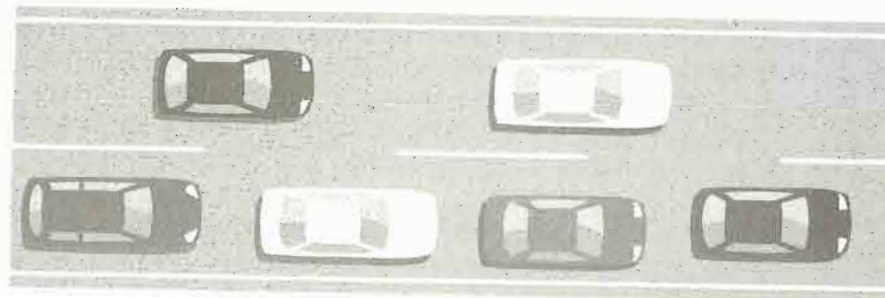
cen, casi siempre, ir más rápido que el nuestro. ¿Cómo se puede tener tan mala suerte? ¿O es quizá una ilusión del conductor?

Resulta que ni lo uno ni lo otro: los coches en el carril de al lado realmente van más rápidos que el nuestro. Pero no es que tengamos mala suerte: escoger el carril equivocado es lo más probable, si tenemos en cuenta el principio de automuestreo. Veamos por qué.

Cuando en un carril los coches avanzan lentamente, están más juntos. No solo eso: la razón por la que se producen retenciones es, precisamente, porque en un carril hay demasiados vehículos. ¿En qué carril es la retención peor? Obviamente, en aquél en el que haya más coches. Si ahora utilizamos el principio de automuestreo, veremos que somos un observador elegido aleatoriamente entre todos los de nuestra clase que son, en este caso, los conductores. Dado que hay muchos más conductores en el carril lento que en el rápido, cabría esperar que nos hallemos en el lento (figura 2).

El fenómeno se puede explicar también de la forma siguiente: en el carril rápido los coches circulan a más velocidad, así que pasan menos tiempo en cada kilómetro. Si comparamos el número de minutos que los coches pasan en cada uno de ellos, veremos de nuevo que el carril lento gana por goleada. Asumiendo que somos un observador elegido al azar, tenemos que concluir que la proba-

FIG. 2



La densidad de coches en nuestro carril es mayor que en el de al lado. En este caso, la probabilidad de encontrarnos en el carril derecho es el doble que la de encontrarnos en el izquierdo.

bilidad de hallarnos en un carril lento es mucho mayor que la de hacerlo en uno rápido.

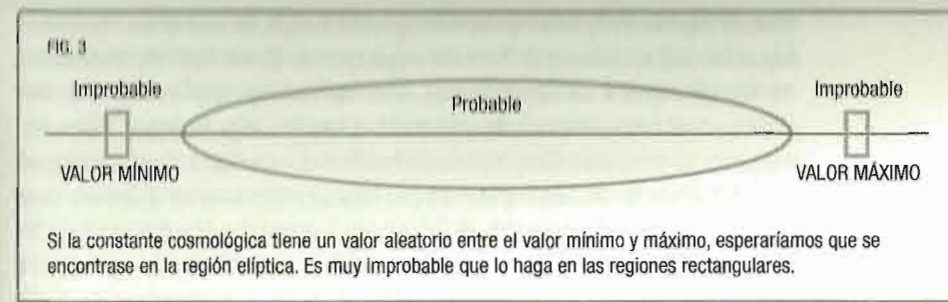
Ese mismo fenómeno se da en la cola de un supermercado. De nuevo, el número de segundos que pasamos en una cola lenta será mayor que el que pasemos en una cola rápida, simplemente porque la cola rápida tarda menos en avanzar. Si ahora nos planteamos cuál es la probabilidad de que, en un momento dado, nos encontremos en una cola lenta, veremos que es más alta que la de encontrarnos en una cola rápida. No es que tengamos mala suerte: de hecho, pasa lo que es más probable.

La solución antrópica al problema de la constante cosmológica

La idea de Boström se puede aplicar fácilmente al aparente ajuste fino de las constantes físicas, pero solo si suponemos que nuestro universo es uno en una multiplicidad: si no lo es, el razonamiento antrópico no ayuda a explicar demasiado el asunto que nos ocupa. Sin embargo, hoy en día la idea de una multiplicidad de universos surge de forma natural en un gran número de teorías; en particular, la teoría de la inflación de Guth predice una infinitud de universos con todas las posibles combinaciones de valores para las constantes físicas, lo que hace que la premisa sea, al menos, razonable.

Supongamos entonces que existe un gran número de universos, todos ellos con una combinación diferente de sus constantes físicas. Nos preguntamos ahora en cuál de ellos esperaríamos encontrarnos, suponiendo que somos un observador elegido aleatoriamente entre todos ellos. Primero, podemos descartar de forma automática todo universo que no contenga observadores, ya que el requerimiento es que seamos un observador elegido al azar. Por consiguiente, esperamos encontrarnos en el universo más probable, dada la condición de que ese universo contenga observadores.

Este razonamiento se puede aplicar al caso específico de la constante cosmológica, como hizo Weinberg para predecir su valor en 1987. En este caso, nos tenemos que preguntar prime-



ro qué valores de la constante cosmológica dan lugar a universos compatibles con la presencia de observadores: estos serán nuestro conjunto de referencia (figura 3). Ningún otro universo entrará en nuestro cálculo, ya que la probabilidad de hallarnos en ellos es cero.

En su artículo «La constante cosmológica», publicado en 1989, Weinberg calculó el valor máximo de la energía de vacío compatible con la existencia de observadores. Recordemos que la energía de vacío es lo que provee la fuerza repulsiva que obliga al universo a expandirse aceleradamente. Weinberg llegó a la conclusión de que era necesaria una densidad de energía de vacío lo suficientemente pequeña para que no evitase la formación de estructuras a gran escala, por ejemplo, del tamaño del sistema solar. Para ello, la energía de vacío tenía que ser entre diez y cien veces mayor que la asociada a la de materia, pero no más.

El número que encontró Weinberg era, por supuesto, solo el valor máximo: lo esperable es que nos encontremos en un universo con un valor aleatorio de la densidad de energía de vacío, que estará entre cero y cien veces la densidad de materia. Las últimas medidas revelan que esa densidad es aproximadamente dos veces mayor que la de materia, lo que es compatible con la predicción de Weinberg.

Alexander Vilenkin refinó el argumento de Weinberg, requiriendo que la constante no solo permitiese la creación de estructuras de gran tamaño, sino que favoreciese tener la máxima cantidad de materia en las galaxias. Sin ello, sería muy poco probable que se formasen *estrellas de segunda generación*, que con-

tienen elementos más pesados que el helio, al haberse formado a partir del remanente de una supernova. Este tipo de estrellas, de las que el Sol es un ejemplo, son las únicas que contienen los elementos necesarios para la vida. Con su argumento, Vilenkin estableció un máximo para la densidad de energía de vacío igual a diez veces la densidad de masa. Si asumimos que nuestro universo ha sido escogido aleatoriamente entre todos los que cumplen esa condición, vemos que el valor actual de la constante cosmológica es perfectamente plausible.

Las trampas del razonamiento antrópico

Los razonamientos antrópicos son complicados, porque es muy difícil aplicar de forma consistente el principio de automuestreo: es casi imposible librarse de incurrir en falacias lógicas al razonar sobre probabilidades que nos incluyen.

Nick Boström menciona en su libro *Sesgo antrópico* un ejemplo clásico en la búsqueda de vida extraterrestre: el célebre astrofísico y divulgador estadounidense Carl Sagan (1934-1996) era de la opinión que, dado que la vida inteligente se había desarrollado en un planeta como la Tierra, este hecho tenía que ser muy probable. Sin embargo, esto es una falacia lógica: si hubiese millones de planetas como la Tierra y solo en uno se hubiera desarrollado la vida inteligente, seguiríamos hallándonos en ese planeta y no en ninguno de los otros. Dado que el desarrollo de vida inteligente es un prerrequisito para hacernos la pregunta, no podemos usar este hecho para computar la probabilidad de que surja vida inteligente en un planeta tipo Tierra. Esto explicaría por qué, a pesar de la continua búsqueda acometida por los proyectos SETI (*Search for Extra Terrestrial Intelligence*), iniciados en los años setenta, aún no hemos encontrado vida inteligente.

Hay, sin embargo, otras formas de estimar la probabilidad de que un planeta tipo Tierra desarrolle vida inteligente. El mismo Brandon Carter que acuñó el principio antrópico dio con un método elegante y curioso, del que Nick Boström se hace eco en su libro antes mencionado.

Carter propone el siguiente experimento mental: una princesa está encerrada en una torre y la única forma de sacarla de allí es abriendo cinco cerraduras de combinación. Los pretendientes solo pueden abrir las cerraduras probando combinaciones al azar. Las cerraduras tienen diferentes dificultades: probando una combinación cada segundo, una tendría que poder abrirse en 0,01 horas, 0,1 horas, 1 hora, 10 horas y 100 horas respectivamente. Los pretendientes tienen exactamente una hora para abrirlas todas en el orden que deseen. Si no lo logran en ese tiempo, se les corta la cabeza.

Los pretendientes van probando a abrir las cerraduras y la gran mayoría mueren decapitados. Después de varios días de espera, finalmente uno logra abrir la puerta. Los tiempos en los que ha logrado abrir las cerraduras son:

0,00583 horas.
0,0934 horas.
0,248 horas.
0,276 horas.
0,319 horas.

Nos preguntamos ahora a qué cerradura corresponde cada tiempo. Obviamente, el primer tiempo debe corresponder a la primera cerradura, dado que se ha abierto en un intervalo de tiempo compatible con lo que uno podría esperar por su dificultad. De forma similar, el segundo debe corresponderse a la segunda cerradura. Sin embargo, y aunque no lo parezca, no podemos determinar a qué cerradura corresponden los tiempos 3, 4 y 5. ¿Por qué? Porque la restricción de que todo el proceso tenga que completarse en menos de una hora crea un sesgo de selección en esos tres números.

Por ejemplo, para la cerradura de cien horas uno esperaría que un pretendiente tardase un tiempo similar en abrirla. Sin embargo, eso nunca sucederá porque a los que tardan más de una hora se les corta la cabeza. Es decir: solo veremos una distribución aleatoria de pretendientes entre los que han logrado abrir la cerradura en menos de una hora. Lo mismo sucede con la cerra-

dura de diez horas y de una hora. Como puede apreciarse, no se puede deducir nada acerca de la probabilidad de éxito solo con mirar el tiempo que han tardado los pretendientes en abrir esas cerraduras, debido al sesgo de selección impuesto por el requisito de limitar el tiempo a una hora.

Sin embargo, siendo conscientes del sesgo de selección sí podemos utilizar esa información para deducir algo sobre la dificultad de las cerraduras: si el tiempo que se tarda en abrir una cerradura es pequeño comparado con el límite temporal establecido por el sesgo, podemos concluir que la probabilidad de abrirla es alta. Si, por el contrario, vemos que el tiempo que se tarda en abrir una cerradura es comparable al límite impuesto, podemos determinar que, como poco, el tiempo medio para abrirla será igual al límite, pero que probablemente sea mucho más.

Esta situación es muy parecida a la aparición de vida inteligente en la Tierra. En este caso, el tiempo que tenemos antes de que nos corten la cabeza es aproximadamente lo que esperamos que viva el Sol, es decir, unos diez mil millones de años. Sin embargo, este número sobreestima el tiempo que nos queda: dado que el Sol aumenta de luminosidad a medida que quema su combustible, es muy probable que la vida en la Tierra no sea posible de aquí a mil millones de años.

Ahora podemos usar este hecho para estimar la probabilidad de que surgiese vida inteligente en la Tierra en el tiempo dado. Primero, hay que darse cuenta de que todo el proceso tiene que darse antes de que pasen unos seis mil millones de años, que es el tiempo desde el nacimiento de nuestro planeta hasta que se vuelva inhabitable. Ahora nos podemos preguntar cuándo esperaríamos que surgiese la vida inteligente si se tratase de un hecho probable: la respuesta es, por supuesto, que hacia el principio, de la misma forma que las cerraduras fáciles se abrían en un tiempo mucho menor al límite impuesto. Si, por el contrario, el desarrollo de vida inteligente fuese improbable, esperaríamos que su desarrollo se produjese después de un tiempo aproximadamente igual al tiempo máximo del que disponemos. Dado que la vida inteligente se ha desarrollado al llegar más o menos al 70% del tiempo disponible, podemos concluir que el desarrollo

LA ECUACIÓN DE DRAKE

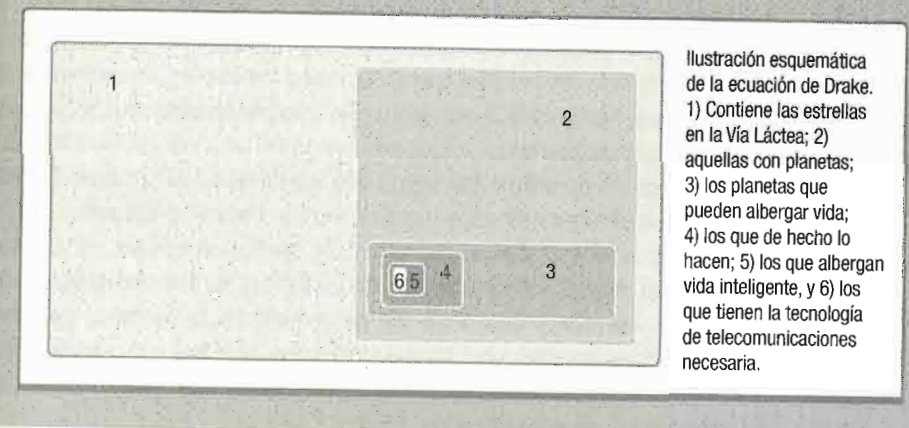
Además del principio antrópico, hay otras formas de estimar la probabilidad de encontrar vida inteligente en otras estrellas. La más famosa es quizá la *ecuación de Drake*, que popularizó el astrónomo estadounidense Frank Donald Drake (n. 1930). Concluyó que el número de civilizaciones en la Vía Láctea capaces de comunicarse con nosotros tenía que depender de los siguientes factores:

- La tasa de formación de estrellas en nuestra galaxia, R_* .
- La fracción de estrellas con planetas, f_p .
- El número medio de planetas por estrella con la capacidad de albergar vida, n_p .
- La fracción de esos planetas que de hecho alberguen vida, f_l .
- La fracción de esos planetas en los que se haya desarrollado la vida inteligente, f_i .
- La fracción de esas civilizaciones que haya desarrollado tecnologías de telecomunicaciones detectables a largas distancias, f_c .
- El tiempo L que sobrevivan esas civilizaciones.

Usando esos factores, Drake llegó a la siguiente expresión para el número de civilizaciones con las que potencialmente podríamos trabar contacto.

$$N = R_* f_p n_p f_l f_i f_c L$$

lo que se conoce como *ecuación de Drake*. El principio antrópico nos puede ayudar a estimar algunos de esos factores, como la vida media de la civilización o la probabilidad de que surja vida inteligente en un planeta que ya tenga vida. A pesar de eso, la incertidumbre en el resto de cantidades es demasiado grande para poder realizar estimaciones útiles.



de vida inteligente en un planeta tipo Tierra es muy improbable. Por el contrario, podemos deducir que el desarrollo de la vida no inteligente es extremadamente probable: solo hay que darse cuenta de que esta surgió casi al principio de la evolución del planeta Tierra, pero necesitó miles de millones de años para generar los primeros animales pluricelulares.

Un principio antrópico aceptable

Hoy en día la mayoría de científicos está de acuerdo en que el principio antrópico en su versión de causa final es inaceptable, porque introduce un elemento no científico en el razonamiento. Por otro lado, un principio antrópico débil que no suponga la existencia de múltiples universos es inútil para hacer predicciones sobre las constantes físicas del nuestro. A pesar de eso, el tipo de razonamiento que sugiere el principio antrópico puede ser usado para llegar a conclusiones sobre otros hechos, como por ejemplo la probabilidad de que surja vida inteligente en un planeta tipo Tierra. Así pues, incluso en su versión menos ambiciosa, el principio antrópico es una herramienta válida para razonar sobre el mundo.

Por otro lado, si aceptamos como válida una de las teorías que dan lugar a múltiples universos, como la inflación de Guth, el principio antrópico pasa a ser una poderosa arma que nos permite hacer una serie de deducciones sobre nuestro propio universo, como el valor de la constante cosmológica. Algunos físicos consideran que las teorías que proponen múltiples universos son acientíficas y especulativas, pero esa misma etiqueta no se puede aplicar al principio antrópico: este es solo una forma de razonar y no afirma nada sobre las leyes del universo, sino que se limita a aplicarse siempre dentro de un modelo físico ya establecido.

El principio antrópico no es ni la varita mágica que puede explicar el porqué de las leyes de la física, ni un razonamiento religioso camuflado tratando de infiltrarse en la ciencia: es simplemente una forma más de reflexionar sobre las características del universo que observamos y sobre hasta qué punto nuestra existencia es responsable de ellas.

Múltiples universos y principio antrópico

La existencia de múltiples universos es necesaria para dotar de un poder predictivo al principio antrópico. Distintas teorías físicas lo consiguen, pero cada una lo hace de forma distinta. Se trata de un tema polémico; el modelo del universo inflacionario, sin embargo, goza de un consenso razonable.

¿Por qué el universo es adecuado para la vida?, se pregunta el físico y divulgador británico Paul Davies (n. 1946) en su libro *El enigma de ricitos de oro*. ¿Hay un hipotético ajuste fino de las constantes tras la existencia de la vida?, se cuestionan algunos, alimentando una controversia que surgió ya hace unos decenios. Según Davies, hay varias explicaciones que pueden fundamentar por qué el universo es tal como es:

1. *El universo absurdo*: nuestro universo es como es y no hay más explicación para ello.
2. *El universo único*: una nueva teoría del todo logrará explicar el porqué de todas las constantes físicas. No existen otros universos con valores distintos a los de estas.
3. *El multiverso*: existen múltiples universos, cada uno con propiedades distintas. Nosotros nos encontramos en uno de los que son aptos para la vida.
4. *El diseño inteligente*: el universo ha sido diseñado por un creador para que albergue vida inteligente.

5. *El principio vital*: hay un principio base que hace que el universo evolucione hacia la vida inteligente.

6. *El universo que se explica a sí mismo*: solo universos con observadores pueden existir.

7. *El universo falso*: vivimos en una simulación.

Entre los físicos los hay que defienden los puntos de vista 1, 2 y 3. Quizá, incluso, el séptimo. Muy pocos de ellos creen en el diseño inteligente o el principio vital. La sexta posibilidad es equivalente al principio antrópico participativo, que usa una interpretación algo modificada de Copenhague para argumentar que el universo necesita ser observado para existir.

La primera explicación es legítima desde un punto de vista científico: si solo existe un universo ¿tiene sentido preguntarse por la probabilidad de que fuese de otra manera? La teoría de la probabilidad solo funciona cuando se aplica a conjuntos de hechos que pueden repetirse, como lanzar un dado. La probabilidad de que nuestro universo sea como lo vemos es exactamente uno, porque es *a posteriori*: ya sabemos cómo es. Esto es lo mismo que preguntarse cuál es la probabilidad de que un equipo de fútbol haya ganado un partido cuando ya conocemos el resultado: o bien es cero, porque el equipo ha perdido, o bien es uno porque ha ganado.

Por supuesto, uno puede preguntarse cuál era la probabilidad de que el universo fuera como lo vemos *a priori*, imaginando que no tenemos información alguna sobre el aspecto actual del cosmos, de la misma forma que podemos asegurar que un equipo de fútbol tenía pocas opciones de ganar un partido, en principio, a pesar de que sepamos que lo acabó haciendo. Sin embargo, en el caso del universo tenemos otro problema: ¿cómo sabemos qué otros universos podemos considerar? ¿Qué constantes de la naturaleza podemos tocar y cuáles están fijas? ¿Son posibles también universos no matemáticos? ¿Y con leyes de la física completamente distintas? Por suerte, estas preguntas tienen respuesta en el marco de distintas teorías, así que su

resolución es menos complicada de lo que podría parecer en un principio.

El universo absurdo presenta, sin embargo, una explicación poco satisfactoria, en el sentido de que no parece dar cuenta de mucho. Aunque sus defensores argumenten que estamos haciendo un mal uso de la teoría de la probabilidad, está claro que somos capaces de imaginar universos distintos. ¿Por qué este universo y no cualquier otro? La respuesta del universo absurdo se parece mucho a un «porque sí».

Un gran número de físicos defienden la segunda opción: la teoría final tiene que poder dar cuenta de todas las constantes, desde la masa de los quarks hasta la intensidad de la fuerza gravitatoria. Sin embargo, los partidarios de esta solución están disminuyendo, debido sobre todo a la incapacidad de la teoría de cuerdas, el mejor candidato que tenemos a una teoría del todo, de predecir las constantes de la física. De hecho, la teoría de cuerdas da lugar a un multiverso con un sinnúmero de leyes donde incluso las dimensiones del espacio pueden ser distintas a las del nuestro.

La idea del multiverso empezó siendo anatema, pero ha ido ganando adeptos a medida que ha ido apareciendo como predicción de multitud de teorías respetables. Hoy en día la comunidad física sigue dividida, pero hay algunos multiversos, en especial el predicho por la teoría de la inflación de Guth, que gozan de gran aceptación entre los físicos.

EL MULTIVERSO DE EVERETT

La idea del multiverso apareció por primera vez en la mecánica cuántica, fruto del trabajo del físico estadounidense Hugh Everett III (1930-1982). La idea de Everett era simple pero revolucionaria: al realizar una medida la función de onda no colapsa, como propone la interpretación de Copenhague, sino que el universo se divide en varios, uno para cada posibilidad. Así formulada, la teoría de Everett, también conocida como *interpretación de múltiples universos* (en la figura 1, vinculada al



Visión del famoso experimento del gato de Schrödinger en la teoría de múltiples universos. El gato tiene un 50 % de posibilidades de morir: según dicha teoría, ambos escenarios existen en universos paralelos.

célebre experimento del gato de Schrödinger), puede parecer una complicación innecesaria, pero solucionaba —o al menos aliviaba— ciertos problemas filosóficos de la interpretación de Copenhague relacionados con el acto de realizar una medida.

Según la mecánica cuántica de múltiples universos, todo lo que es físicamente posible sucede en algún universo: por ejemplo, si un cierto experimento tiene dos resultados posibles, el universo se dividirá en dos, uno para cada uno de ellos. En lugar de un científico ahora tendremos dos, cada uno de los cuales ha medido un resultado distinto.

Según la interpretación de múltiples universos, todas las posibilidades para la evolución de nuestro cosmos se dan en algún universo. Podría ser que existiese un universo donde los dinosaurios nunca se han extinguido o donde Hitler ganase la Segunda Guerra Mundial. También podría ser que en otro universo nunca hubiésemos nacido o incluso que hubiéramos muerto en la infancia.

Los múltiples universos de la mecánica cuántica tienen una relación complicada con el principio antrópico. En un sentido, pueden ayudar a explicar coincidencias dentro de nuestro universo: ¿por qué se dieron las consecuencias exactas para nues-

tro nacimiento? Quizá solo se dieron en un universo, pero este resulta ser el que habitamos, dado que no podemos ser conscientes de estar en ningún otro. ¿Por qué no vivimos en un universo donde la Tierra describe una órbita un poco más cercana o lejana al Sol? ¿Por qué nuestro Sol tiene el tamaño justo para la vida? De nuevo, puede que en otro universo eso no sea así, pero no estamos allá para verlo. En este sentido, el razonamiento antrópico se puede aplicar en el contexto de la mecánica cuántica de múltiples universos para explicar ciertas características del universo a nuestro alrededor.

Sin embargo, el multiverso de la mecánica cuántica no es suficiente para, junto con el principio antrópico, explicar el valor de las constantes físicas, dado que estas nos vienen dadas. En este sentido, uno no puede usar la interpretación de múltiples universos para justificar la validez del principio antrópico ni, en particular, para explicar el ajuste fino de las constantes.

EL UNIVERSO INFINITO

Hay otra forma de obtener un multiverso que no requiere de la mecánica cuántica, sino simplemente de la planitud del universo. Si el universo es plano, eso significa que su extensión es infinita. Por supuesto, debido a la expansión del universo, solo podremos observar directamente una cierta región, llamada el «universo observable», porque a mayor distancia la expansión es más rápida que la luz. Pero eso no quita que el universo sea, en principio, infinito.

Los infinitos son peligrosos, porque conllevan una multitud de hechos aparentemente paradójicos pero que pueden ser demostrados matemáticamente. Por ejemplo, si el universo es infinito, en algún punto tiene que existir una copia exacta de la Tierra junto con todos sus habitantes. De hecho, es posible calcular exactamente cuánta distancia habría que moverse en una cierta

Se supone que la «realidad» física es la función de onda de todo el universo en sí mismo.

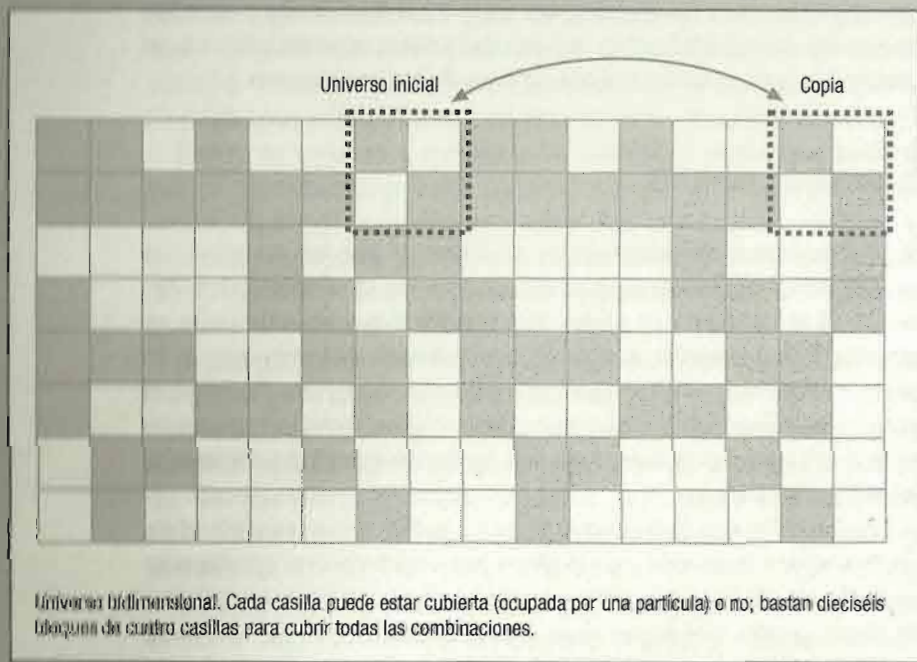
HUGH EVERETT III

¿A QUÉ DISTANCIA SE HALLA NUESTRO CLON MÁS CERCANO?

En el artículo que lleva por título «Universos paralelos» (*Parallel universes*) que Max Tegmark publicó en la revista *Scientific American* en mayo de 2003, el cosmólogo realiza un cálculo aproximado de la distancia más próxima hasta nuestro clon más cercano (véase la ilustración de las págs. 72-73, inspirada en el citado artículo). Para ello, tenemos que considerar primero un problema simplificado: un universo bidimensional donde solo hay un tipo de partícula.

Simulando el multiverso

Empecamos por un universo muy pequeño, donde solo hay cuatro casillas que pueden estar ocupadas o no. En cada una de las casillas tenemos únicamente dos posibilidades: o bien hay una partícula o bien no hay ninguna, como se puede observar en la figura. Dado que tenemos solamente cuatro espacios, solo existen $2^4 = 16$ configuraciones distintas para nuestro universo. Si ahora empezamos a poner otros universos del mismo tipo a su lado, veremos que tarde o temprano el primero tendrá que repetirse. Se trata de un proceso aleatorio, así que no podemos dar un número exacto para la distancia a la que encontraremos la primera copia del primer universo, pero sí que podemos afirmar que, de media, lo haremos a



unos cuatro diámetros del universo inicial, como se puede observar en la figura. Este número coincide con la potencia de dos que nos da el número total de combinaciones.

Humanos y universos

Podemos hacer lo mismo ahora con una persona. En este caso, debemos dividir su volumen por el volumen de Planck, el mínimo posible, para obtener el número de casillas disponibles. El volumen de un cuerpo humano es de aproximadamente 100 l o de $0,1 \text{ m}^3$; el volumen de Planck es de unos 10^{-106} m^3 . Así pues:

$$\text{Número de casillas} = \frac{0,1}{10^{-106}} = 10^{104}$$

En este caso, podemos asumir de forma simplificada que hay unas dos posibilidades para cada casilla, dando un resultado de:

$$\text{Número de posibilidades} = 2^{10^{104}} \text{ posibilidades.}$$

Se trata, por supuesto, de un número enorme. Como en el ejemplo anterior, nuestro clon más cercano se encontrará a una distancia igual al diámetro de una persona, multiplicado por el número de combinaciones. Es decir:

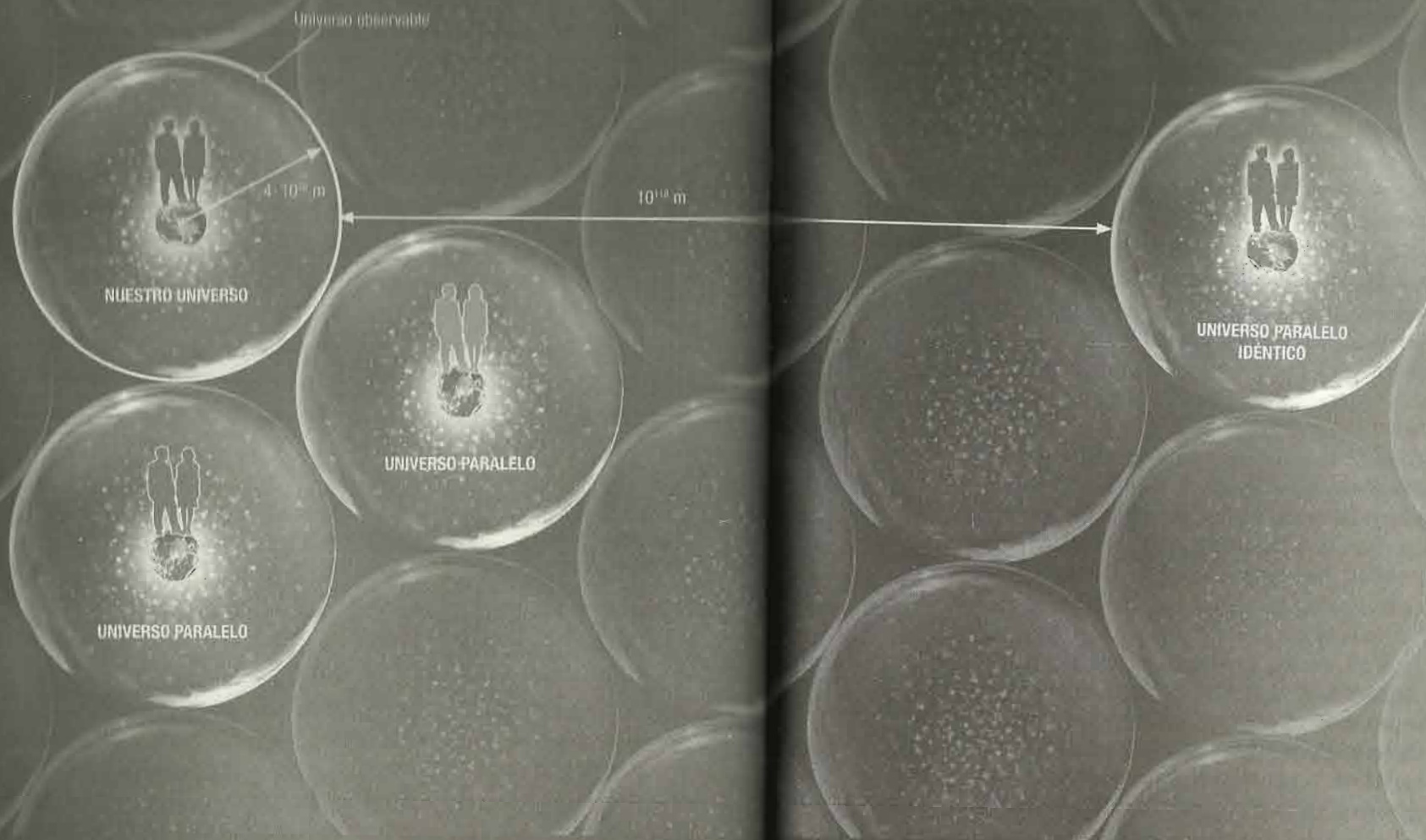
$$\text{Distancia al clon más cercano} = 1 \text{ m} \cdot 10^{104} = 10^{104} \text{ m.}$$

Dado que el tamaño del universo observable es de unos 10^{26} m , se trata de una distancia considerable. Sin embargo, en un universo infinito cualquier distancia es despreciable, ya que es infinitamente menor que el todo. Podemos realizar un cálculo similar para encontrar la distancia al siguiente universo que sea una copia exacta del nuestro. En este caso, obtenemos un resultado de 10^{118} m , que es un número inimaginable.

Tal vez no tan lejos

Por supuesto, estos cálculos asumen que todo, hasta la partícula elemental más insignificante, tiene que ser exactamente igual. Si no fuera así y pudiésemos contentarnos con un nivel de detalle mucho menor, la respuesta sería muy diferente. En realidad, habrá una gran cantidad de combinaciones que den resultados equivalentes a nuestra persona, aunque no se trate de un clon perfecto. Así pues, nuestro clon podría encontrarse más cerca de lo que creíamos.

DISTANCIA AL UNIVERSO PARALELO MÁS LEJANO



EL UNIVERSO PARALELO SEGUN TEGMARK, UNA REGION DEL ESPACIO DEMASIADO LEJANA PARA SER VISTA

«¿Hay una copia de todos los que estamos leyendo este texto...?», se pregunta Max Tegmark en el artículo «Universos paralelos». Y sigue: «¿...una persona que no es usted pero que vive en un planeta llamado Tierra, con montañas brumosas, campos fértiles y extensas ciudades, en un sistema solar compuesto por ocho planetas? Quizá él o ella deje de leer en este momento mientras

usted prosigue». Tegmark enfatiza la idea de que, aunque pueda parecer inverosímil, debemos hacernos a la idea de que tenemos un *alter ego*, porque así lo refrendan las observaciones astronómicas realizadas. Y es que en un espacio infinito, incluso los eventos más improbables pueden tener lugar en alguna parte. Pero las posibilidades de que nos encontremos con nuestro clon son escasísimas: de existir, está demasiado lejos.

dirección para encontrar la copia más cercana: el cosmólogo sueco-estadounidense Max Tegmark (n. 1967) ha llegado incluso a hacerlo, cifrándola en unos 10^{26} m hasta toparnos con un clon de nosotros mismos. Si caminásemos 10^{26} m, encontraríamos una esfera con un radio de cien años luz igual a la centrada en la Tierra, lo que significa que cualquier hecho percibido por esos humanos durante los próximos cien años sería exactamente igual al percibido por los de la Tierra.

Algunos filósofos, como el español Jesús Mosterín (n. 1941), consideran este tipo de razonamiento falaz. Mosterín razona como sigue: a pesar de que puede parecer que, dada una infinitud, todas las posibles combinaciones tienen que ocurrir una cantidad infinita de veces, esto no es así. Por ejemplo, consideremos la siguiente secuencia de números:

10111111...

Y así infinitamente. Imaginemos ahora otra secuencia basada en la anterior, donde simplemente hemos desplazado el cero a la derecha:

11011111...

Dado que tenemos un número infinito de cifras, podemos desplazar el cero a la derecha tantas veces como deseemos. Esto significa que podemos generar un número infinito de secuencias que, sin embargo, no cubren todas las combinaciones posibles. Por ejemplo, uno no llegará nunca a ver lo siguiente:

12011111...

En matemáticas hay múltiples ejemplos de series infinitas que, sin embargo, no pasan por todas las combinaciones. Uno de ellos es la serie de todos los pares, que es infinita pero, a su vez, deja de

lado a la otra mitad de los números naturales. Hay muchos otros casos, posiblemente un número infinito de ellos.

Sin embargo, el argumento de Mosterín no tiene en cuenta que, según todo lo que sabemos hasta la fecha sobre mecánica cuántica y teoría de la relatividad, el espacio está granulado, siendo el menor tamaño posible, como poco, unos $1,6 \cdot 10^{-36}$ m, lo que se suele conocer como la *longitud de Planck*. Debido a esta granularidad fundamental del espacio, el total de combinaciones que puede tener una cierta cantidad de materia en un espacio dado es finito, con el número máximo de posibilidades dado por esa granularidad. Por supuesto, en la práctica la longitud de Planck es poco relevante y el número de posibilidades a la escala que nos interesa será mucho menor: si uno se encuentra a su clon en una galaxia vecina, le dará absolutamente igual si uno de sus electrones está en una posición distinta. De hecho, modificaciones a escala celular tampoco serían relevantes.

La segunda razón por la que el argumento de Mosterín falla es que en las diferentes posibilidades que veríamos hay un componente aleatorio: la secuencia que propone está determinada de antemano y, por lo tanto, nunca podrá pasar por según qué combinaciones. Sin embargo, sabemos con certeza que nuestra existencia es una posibilidad para el universo, ya que, de no serlo, no existiríamos. Una infinitud que escoge números aleatorios de un conjunto finito escogerá, tarde o temprano, cada uno de esos números una cantidad infinita de veces. Es decir: todo lo físicamente posible pasará, si uno viaja lo suficientemente lejos.

El multiverso que surge al considerar la infinitud del universo es muy parecido al de la interpretación de múltiples universos, en el sentido de que no contempla una modificación de las constantes físicas, sino solo las distintas posibilidades que estas nos ofrecen. De nuevo, puede ser usado para explicar ciertas coincidencias en la distribución de materia a nuestro alrededor, pero no para dar cuenta de, por ejemplo, el valor de la constante cosmológica. Para ello se necesita otro tipo de multiverso donde las constantes de la física en sí varíen de uno a otro. Por suerte, la teoría de la inflación nos provee con uno que hace exactamente eso.

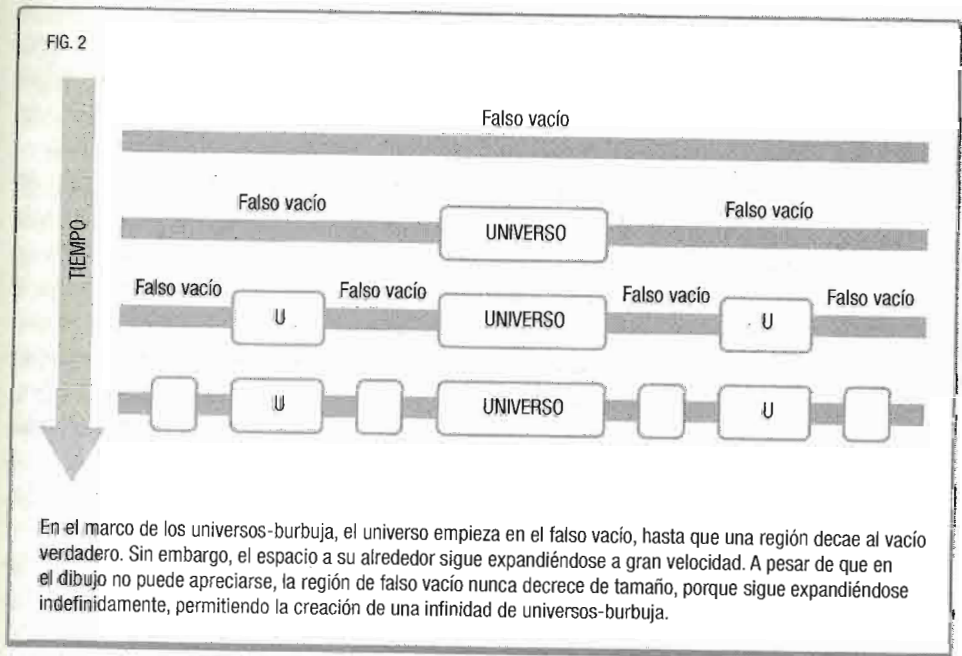
Recordemos que la teoría de la inflación afirma que nuestro universo atravesó una época inflacionaria en la que su tamaño creció a gran velocidad, dando como resultado la geometría plana que observamos hoy en día. La teoría de Guth no solo solucionó el problema de la planitud, sino que dio cuenta de otros: por ejemplo, la física de partículas predecía la existencia de una gran cantidad de un tipo de partículas llamadas *monopolos magnéticos*, el equivalente de las cargas eléctricas para el campo magnético. Estos monopolos magnéticos tendrían que haber sido abundantes al principio del universo y, además, no tendrían ninguna partícula menos pesada a la que decaer, así que tendrían que ser estables. ¿Dónde están ahora? La inflación de Guth resolvió el problema expandiendo el universo de tal forma que la concentración de monopolos se volviese indetectable.

Conviene pararse aquí a hablar de lo que causa la inflación: como se ha visto, el universo se encontraba en un falso vacío, lo que significa que la energía del vacío no era la menor posible. Es esa energía la que causó la rápida expansión del universo: al decaer el falso vacío a su estado actual, la aceleración frenó bruscamente y toda la energía sobrante se utilizó para crear las partículas que quedan hoy, dando lugar al universo que conocemos.

Sin embargo, pronto nos vemos con un problema: la tasa de expansión del universo era muy rápida, demasiado para que la transición al vacío verdadero se diera en todo el universo a la vez. Una región que empezase a decaer al vacío verdadero no tendría forma de comunicar su estado al resto. Ni siquiera una señal viajando a la velocidad de la luz hubiera podido llegar con suficiente rapidez al otro lado del universo: distintas regiones estaban «causalmente desconectadas», es decir, no podían afectarse mutuamente. Supongamos que una pequeña región del universo decae al vacío verdadero: ¿cómo lo puede saber una región a su lado? La respuesta es que no puede. La expansión es tan rápida que regiones suficientemente alejadas se separan más rápidamente que la velocidad de la luz: la región de al lado nunca sabrá que su vecina ha decaído al vacío verdadero.

Debido a que la teoría de la inflación se basa en la mecánica cuántica, el acto de decaer al vacío verdadero es aleatorio: algunas regiones lo harán inmediatamente, mientras que otras no lo harán nunca. De hecho, si uno suscribe la interpretación de múltiples universos, cada región se encontrará en una superposición entre el estado donde ha decaído y aquél en el que no lo ha hecho. Pero la idea clave es que las regiones de vacío verdadero decaen más lentamente que las de vacío falso, ya que no hay tanta energía de vacío para acelerar la expansión. Así pues, aunque una región del espacio decaiga y empiece la expansión normal que asociamos a nuestro universo, el espacio a su alrededor continuará expandiéndose mucho más rápidamente.

Pongamos que ahora otra región próxima a la nuestra decae al vacío verdadero: dado que ambas regiones se expanden más lentamente que el espacio que las separa, nunca se encontrarán. Es decir: tenemos dos regiones del universo causalmente desconectadas. Dos «universos-burbuja» (figura 2).



Como muestra el esquema, al principio el universo se encuentra en un estado de falso vacío cuyo tamaño aumenta exponencialmente, es decir, se multiplica por dos cada cierto tiempo. En

En ausencia de observadores,
nuestro universo está muerto.

ANDRÉI LINDE

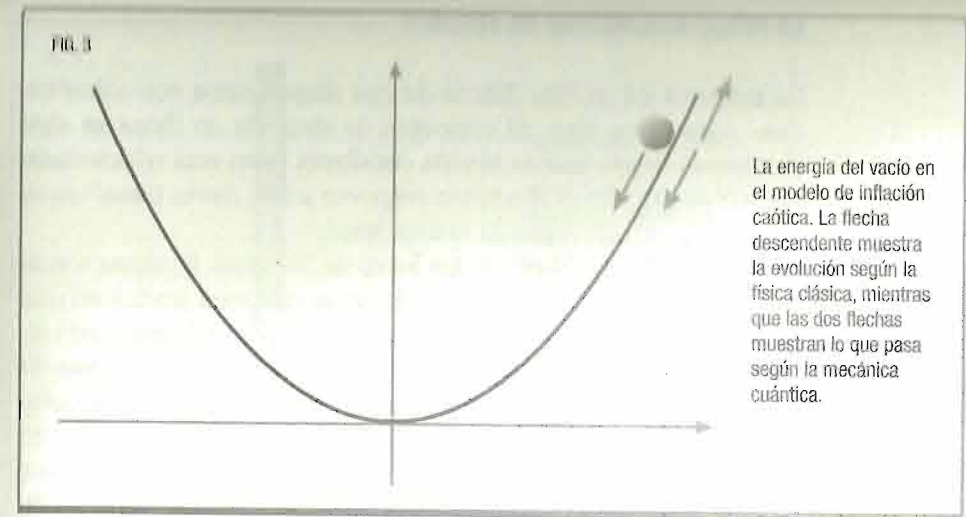
un instante dado, una región del universo decae al vacío verdadero, pero el universo se ha expandido tanto que las otras regiones tienen tanto o más volumen que el tamaño original del cosmos. A medida que la inflación

continúa, más regiones decaen al vacío verdadero, pero el espacio entre ellas se ha expandido tanto que es mayor que lo que había inicialmente: es decir, la parte inflacionaria se expande tan rápido que tenemos más y más espacio, a pesar de que en ella se generan constantemente burbujas donde la expansión se frena.

Este escenario nos muestra que la inflación continuará para siempre, creando una cantidad ilimitada de universos-burbuja. A esto se le suele llamar el modelo de la «inflación eterna». La inflación eterna da lugar a otro multiverso: primero, a cada instante se están formando multitud de universos-burbuja aislados causalmente los unos de los otros. Segundo, disponemos de una cantidad infinita de tiempo, ya que la inflación continúa para siempre. Así pues, hay que concluir que nuestro universo es solo uno entre una infinitud de universos-burbuja aislados entre sí.

El multiverso inflacionario genera una gran cantidad de universos, pero si solo existe un estado de falso vacío y uno de vacío verdadero da lugar a algo parecido al multiverso cuántico: una multiplicidad de universos con las mismas leyes de la física y distintas configuraciones de materia. Hay, sin embargo, otra versión de la inflación ideada por el físico ruso-estadounidense Andréi Linde (n. 1948) llamada *inflación caótica*, que da lugar a un gran número de universos que, además, tienen leyes distintas de la física. Este es el tipo de multiverso que, en combinación con el principio antrópico, se puede usar para resolver el problema de la constante cosmológica.

En la inflación caótica, el vacío empieza con una cierta energía elevada, que va descendiendo lentamente hacia el mínimo en algo que se ha dado en llamar *bajada lenta* (figura 3). En física clásica,



el universo simplemente se dirigiría rápidamente hacia el punto de mínima energía: pensemos en lo que pasaría si pusiéramos una pelota en cualquiera de los extremos del gráfico. En la mecánica cuántica, sin embargo, la situación es más compleja: debido al principio de incertidumbre, hay una cierta probabilidad de que el vacío vaya a un estado de más energía, no solo de menos.

Si la pendiente de nuestro gráfico es pequeña, entonces el falso vacío decaerá a vacíos de menor energía lentamente, lo que le dará tiempo a expandirse tanto que siempre haya regiones con la máxima energía. Es decir: dado que las regiones de máxima energía se expanden más rápidamente, aunque parte de ellas decaiga a un valor menos energético, seguirá habiendo cada vez más espacio en el estado de máxima energía.

La inflación caótica es distinta de la original porque predice que habrá universos en un gran número de falsos vacíos, que dependerán de las diferentes energías en las que esa región haya salido de la fase inflacionaria. Esto es importante, porque distintos falsos vacíos dan lugar a diferentes leyes de la física. Para entender por qué cada falso vacío lleva aparejadas leyes físicas diferentes tendremos que introducir dos conceptos: por un lado, algo llamado *la rotura espontánea de simetría*; por otro, *la teoría de cuerdas*.

La rotura espontánea de simetría

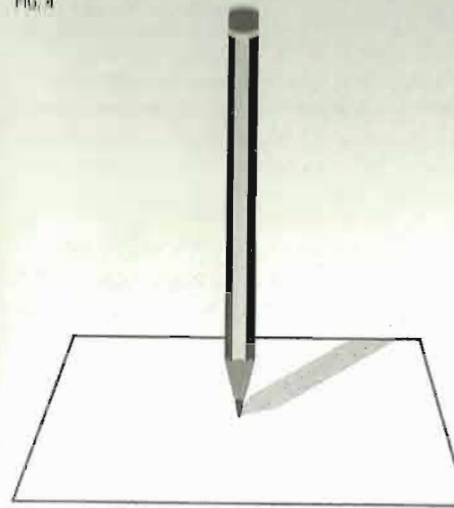
La mayoría de teorías físicas de que disponemos son «simétricas» respecto a algo. El concepto de simetría en física es algo distinto al que se usa en la vida cotidiana, pero está relacionado con él: una teoría es simétrica respecto a una cierta transformación si esa transformación la deja igual.

Pongamos, por ejemplo, las leyes de Newton. Si ahora tomásemos el universo entero y lo girásemos cuarenta grados en una dirección cualquiera, veríamos que las leyes no cambian: son simétricas respecto a rotaciones. De la misma forma, las leyes de Newton se aplican tanto ahora como de aquí a tres años y tanto aquí como en Neptuno: decimos que son invariantes respecto a traslaciones temporales y espaciales. Toda teoría física tiene ciertas simetrías respecto a las cuales no cambia: algunas de esas simetrías son parecidas a las que vemos en nuestro día a día, como la simetría de espejo. Otras se refieren a transformaciones abstractas de las ecuaciones sin ningún equivalente visible.

A pesar de que las leyes de Newton son simétricas respecto a las rotaciones, nuestro mundo no lo es. El sistema solar no tiene el mismo aspecto si se mira en el plano de rotación de los planetas que si se hace en un ángulo de noventa grados con este. Tampoco es simétrico respecto a traslaciones en el tiempo: la Tierra era muy distinta hace tres mil millones de años. Así pues, a pesar de que las leyes son simétricas, el universo al que dan lugar no lo es. A ese fenómeno lo llamamos *rotura espontánea de simetría*.

Un caso sencillo de rotura espontánea de simetría es un lápiz suspendido sobre su punta (figura 4). En este caso, la situación es simétrica respecto a rotaciones alrededor del lápiz: el lápiz está en el centro exacto y la situación no cambia, se mire desde el ángulo que se mire. Sin embargo, cuando lo soltamos, el lápiz caerá hacia un lado en particular, rompiendo la simetría de rotación. A pesar de que la situación inicial era simétrica, había opciones mucho más estables que rompían la simetría. Cualquier ángulo hubiera sido igualmente bueno para reducir la energía del lápiz, pero el lápiz ha tenido que escoger uno. Una situación simétrica da lugar a otra que no lo es.

FIG. 4



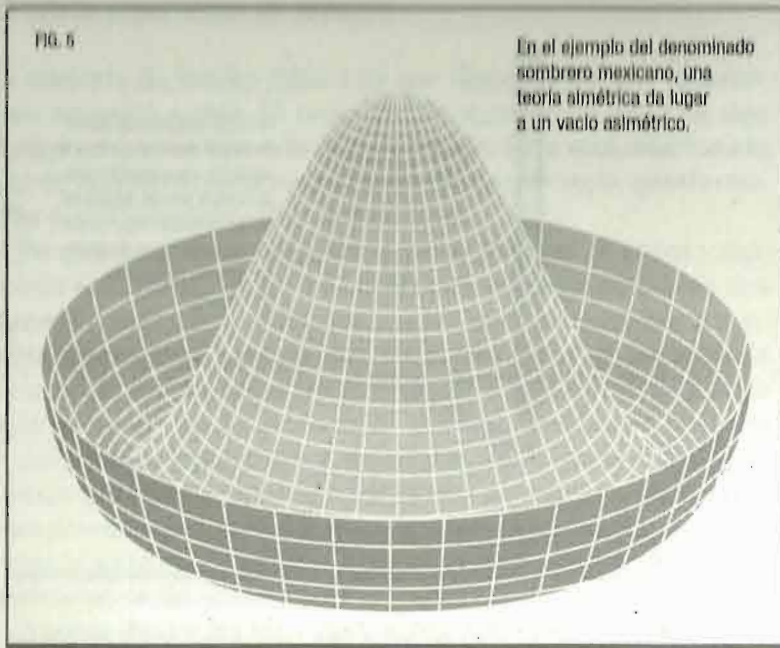
Un lápiz suspendido sobre su punta. A pesar de que la situación es originalmente simétrica, pronto dejará de serlo, ya que el lápiz caerá hacia algún lugar aleatorio, rompiendo la simetría de rotación.

Otra situación similar es la transformación del agua en hielo, lo que los físicos suelen llamar un «cambio de fase». El agua es aproximadamente simétrica respecto a rotaciones: tiene el mismo aspecto se mire como se mire. Sin embargo, el hielo no lo es: tiene una estructura cristalina que, por lo tanto, cambia según en qué orientación se mire. Aquí tenemos, de nuevo, un estado simétrico de alta energía —el agua— que da lugar a un estado asimétrico de menor energía, el hielo. Al buscar el estado de menor energía, la simetría se rompe aunque no hay nada en las ecuaciones que indique que eso va a suceder.

Algo parecido pasa con el vacío cuántico: una teoría simétrica tiene un estado de mínima energía que rompe esa simetría. Eso hace que el vacío resultante no sea simétrico, lo que a su vez causa toda la serie de fenómenos interesantes que vemos a nuestro alrededor. Un universo perfectamente simétrico sería muy aburrido: no podrían existir estructuras de ningún tipo, porque romperían la simetría rotacional. Nuestra existencia se debe al hecho de que el estado de menor energía del vacío rompe la simetría de las ecuaciones.

Fig. 5

En el ejemplo del denominado sombrero mexicano, una teoría simétrica da lugar a un vacío asimétrico.



Una forma de imaginarlo se representa en la figura 5, donde la altura del «sombrero mexicano» nos señala la energía de distintas configuraciones del vacío. Nuestro vacío empieza en el centro, ya que nuestra teoría es simétrica: lo podemos imaginar como una canica depositada en la punta del sombrero. Sin embargo, la canica está en una situación de «equilibrio inestable»: cualquier perturbación, por pequeña que sea, la mandará hacia abajo. Lo que es esencial aquí es darse cuenta de que la canica podría ir a parar a cualquier lado: todos los puntos de la parte baja del sombrero son igualmente buenos y, de hecho, son indistinguibles. Pero la canica tiene que escoger uno, el que sea. Y, al hacerlo, la simetría de la situación quedará rota: para la canica, ahora el «centro» está en su posición y hay una clara asimetría entre su izquierda y su derecha. Una situación simétrica ha dado lugar a otra asimétrica.

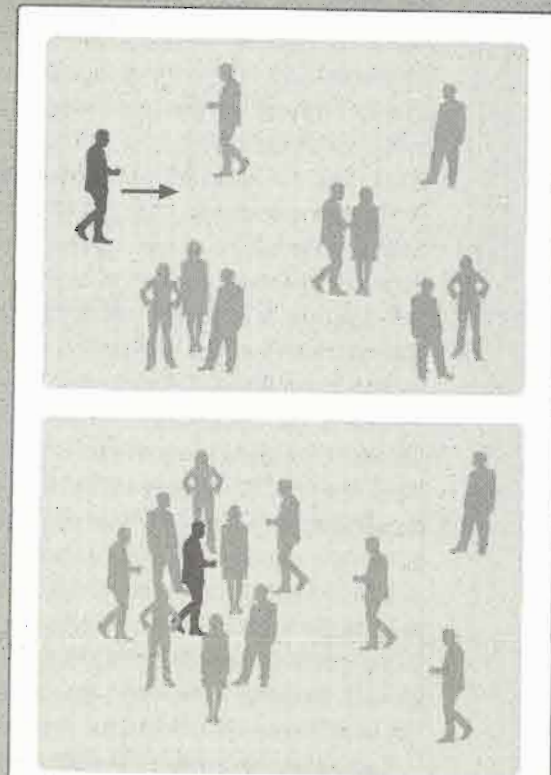
La rotura espontánea de simetría es una parte fundamental del modelo estándar que da lugar a la separación entre la fuerza electromagnética y la nuclear débil. Originalmente, ambas fuer-

ROTURA ESPONTÁNEA DE SIMETRÍA Y EL BOSÓN DE HIGGS

La rotura espontánea de simetría es la responsable de que algunas de las partículas del modelo estándar ganen masa. El vacío está impregnado por el denominado *campo de Higgs*, que da lugar a cuatro partículas sin masa. Sin embargo, tres de ellas acaban siendo absorbidas por las partículas que dan lugar a la fuerza electrodébil, rompiendo su simetría y separándola en la fuerza débil y el electromagnetismo. El bosón de Higgs que queda también gana masa e interactúa con el resto de partículas del modelo estándar, volviéndolas también masivas.

Los bosones, invitados con ganas de charlar

Una forma sencilla de imaginar cómo el Higgs da masa a las partículas es pensar en una fiesta donde uno está intentando ir de una punta de la sala a otra. Una partícula sin masa iría en línea recta y a la máxima velocidad posible, que es la velocidad de la luz. Sin embargo, debido a la presencia de los invitados, que juegan un papel análogo al del bosón de Higgs, nos veremos obligados a detenernos para hablar con gente cada dos por tres, lo que ralentiza nuestro camino de forma considerable. La interacción con los invitados hace que la persona en cuestión parezca haber ganado masa: se mueve más lentamente de lo que lo haría si no tuviera masa alguna. Es preciso recalcar que, a pesar de que algunas partículas como los electrones ganan su masa de esta manera, la mayor parte de la masa del universo surge de la interacción entre quarks, que da lugar a protones y neutrones.



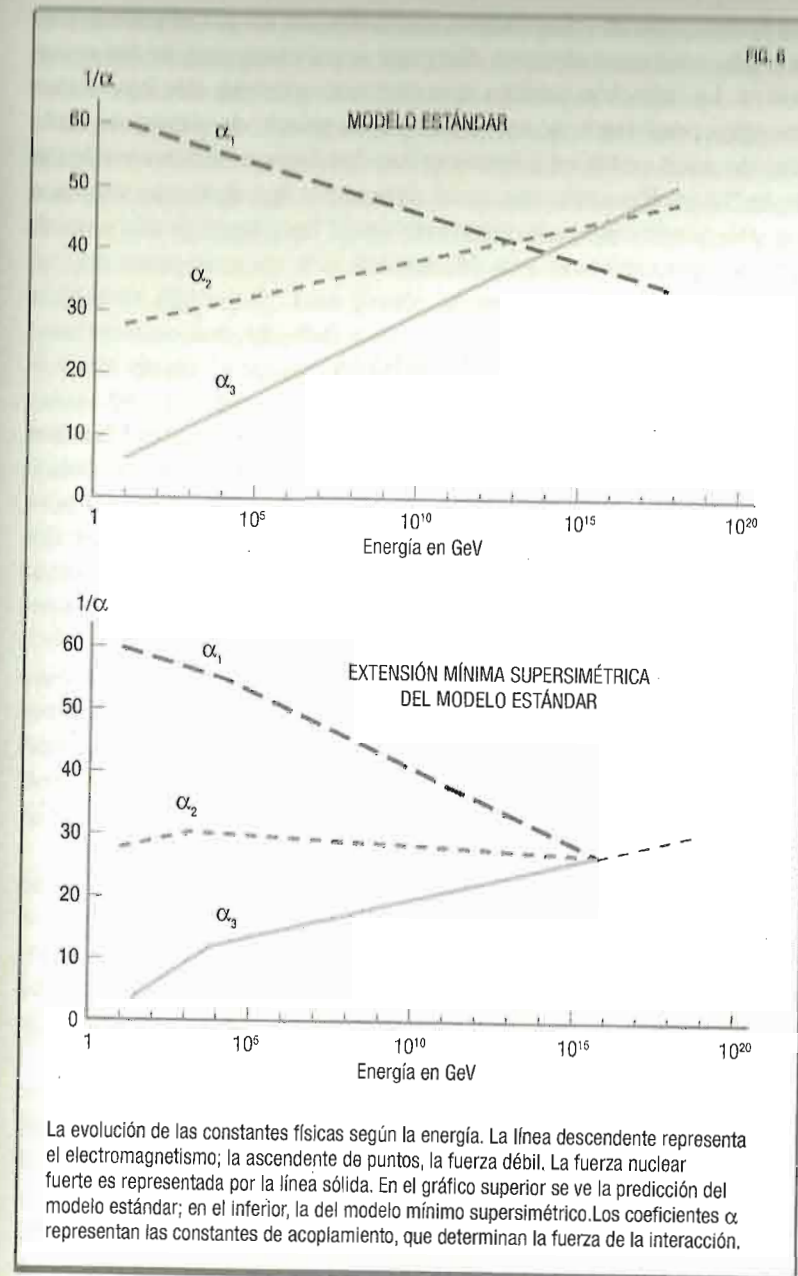
La analogía de la fiesta. Un invitado trata de ir al otro lado, pero se ve interrumpido por el resto.

zas eran parte de una misma fuerza llamada *electrodébil*; sin embargo, la rotura espontánea de simetría, causada por el bosón de Higgs, hace que se separe en las dos que conocemos hoy en día. Una gran mayoría de físicos creen que tiene que ser posible unificar las tres fuerzas no gravitatorias en una *superfuerza* que dé lugar, después de una rotura espontánea de simetría, a las que conocemos hoy en día.

La rotura espontánea de simetría está íntimamente relacionada con la energía media de las partículas en el universo. De la misma forma que el agua, un estado de alta energía, es simétrica mientras que el hielo no lo es, la simetría se ve restaurada cuando la energía de las partículas es suficientemente alta. En física de partículas esto se ve reflejado en la idea de que las constantes que gobiernan las distintas interacciones no están fijas, sino que «corren»: cambian con la energía de las partículas que las experimentan. La idea de que podemos tener diferentes constantes de la física según la energía de nuestras partículas es una pista importante sobre cómo transformar el multiverso inflacionario en algo que haga posible el razonamiento antrópico.

La figura 6 muestra cómo las diferentes intensidades de las interacciones entre partículas cambian según la energía. Como puede apreciarse, a mayor energía las tres intensidades se acercan cada vez más, lo que parece indicar algún tipo de unificación. Es decir: cuando el universo era joven y la energía disponible era alta, las tres fuerzas eran indistinguibles y parte de una misma superfuerza. A medida que el universo se enfrió, la simetría se rompió y dio lugar a tres fuerzas aparentemente distintas, en un proceso análogo al agua volviéndose hielo. Esta aparente convergencia de fuerzas ha convencido a una mayoría de físicos de que tiene que ser posible unificarlas: una modificación del modelo estándar llamada *extensión mínima supersimétrica* predice que las tres fuerzas tendrían que ser indistinguibles a altas energías.

La rotura espontánea de simetría, junto con la expansión caótica, nos da la posibilidad de tener diversos universos con distintas leyes. Si ponemos diez botellas de agua en el congelador, todas cristalizarán en una dirección distinta, ya que la rotura espontánea de simetría es un proceso aleatorio. De la mis-



ma forma, cuando el universo «cristaliza» a un estado de menor energía, podemos obtener distintas combinaciones de las constantes. La inflación caótica nos asegura, además, que hay varias energías posibles a las que el universo puede decaer: para cada uno de esos posibles falsos vacíos, tendremos diferentes leyes de la física. Sin embargo, ¿qué determina los distintos vacíos a los que puede decaer nuestro universo? Para averiguarlo necesitamos introducir la *teoría de cuerdas*.

EL PAISAJE DE LA TEORÍA DE CUERDAS

La teoría de cuerdas es un intento de unificar las tres fuerzas subatómicas con la gravedad. Cuantizar la gravedad ha resultado ser un problema mucho más complicado de lo que nadie esperaba en un principio: todos los cálculos que se intentan llevar a cabo usando la mecánica cuántica dan resultados infinitos. Además, tenemos una cantidad irrisoria de datos experimentales sobre la gravedad cuántica porque, al ser la gravedad tan débil, es casi imposible explorar sus efectos a escalas microscópicas.

La teoría de cuerdas afirma que las partículas no son puntos, sino pequeñas cuerdas cuyos distintos estados de vibración dan lugar a las partículas que conocemos. Al dar extensión a las partículas elementales, la teoría de cuerdas elimina muchos de los problemas de infinitos que surgen en la mecánica cuántica.

Explicar la teoría de cuerdas en unas pocas páginas o incluso en un libro es una tarea imposible, por lo que en este caso nos centraremos en las características de la teoría que son de interés para generar un multiverso que, junto con un razonamiento antrópico, den cuenta del ajuste fino de las constantes, en particular el de la constante cosmológica.

Una de las propiedades más importantes de la teoría de cuerdas es que predice un espacio-tiempo de diez dimensiones. El espacio-tiempo puede imaginarse como si añadiésemos el tiempo como una dimensión más del espacio: por ejemplo, nuestro universo parece tener un espacio-tiempo de cuatro dimensiones, tres de espacio y una de tiempo. Dado que el espacio-tiempo en

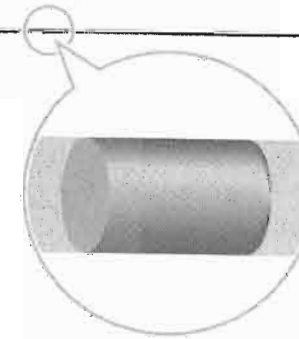
el que vivimos tiene cuatro dimensiones pero la teoría de cuerdas predice diez, parece que haya un problema con la teoría, que no es capaz de dar cuenta del mundo en el que vivimos.

El problema se puede solucionar con algo llamado «compactificación». Consiste en suponer que algunas de las dimensiones son tan pequeñas que no podemos observar sus efectos. Imaginemos, por ejemplo, un cable de metal: visto de cerca, se trata de una estructura de dos dimensiones, si nos centramos en su superficie (figura 7). Uno puede moverse a lo largo del cable, pero también a su alrededor en un círculo. No obstante, si vemos el cable desde la lejanía nos parecerá que es una línea infinitamente fina, por la que solo nos podemos mover a la izquierda y a la derecha: una de las dimensiones del cable es tan pequeña que podemos ignorarla a todos los efectos.

En teoría de cuerdas pasa algo parecido: seis de las dimensiones son tan pequeñas que no tienen efectos observables. Por alguna razón desconocida, solo cuatro de las dimensiones se han expandido, dando lugar al universo que observamos.

Es muy difícil imaginar la compactificación de las seis dimensiones extra, porque las personas hemos evolucionado para movernos por un mundo de tres dimensiones, cuatro si contamos el tiempo. Lo que resulta esencial para entender por qué la teoría de cuerdas da lugar a diferentes leyes de la física es que la compactificación no puede hacerse de cualquier manera, sino que las

FIG. 7



Vista de cerca, la superficie de un cable tiene dos dimensiones: de lejos, la dimensión vertical se pierde y el cable puede verse como una línea unidimensional.

dimensiones extra tienen que contraerse de una forma especial, de forma que den lugar a la realidad que observamos. En particular, las dimensiones compactificadas tienen que tener una forma geométrica llamada *espacio de Calabi-Yau* (por los matemáticos Eugenio Calabi y Shing-Tung Yau, representado en la figura 8), aunque en realidad se trata de figuras de seis dimensiones que no pueden ser reproducidas en papel.

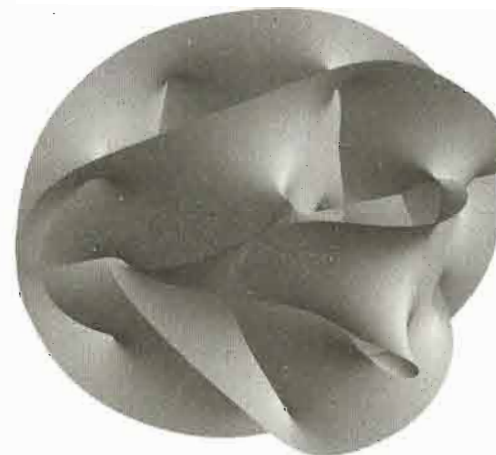
Los espacios de Calabi-Yau eran hasta hace poco una curiosidad matemática, pero su papel en la teoría de cuerdas ha hecho que su interés por ellos se dispare. En particular, los físicos necesitan saber cuántos tipos distintos de espacios de Calabi-Yau hay: cada espacio corresponde a una compactificación diferente, que a su vez corresponde a unas leyes de la física distintas. Es decir, el número de espacios de Calabi-Yau se corresponde directamente con el número de posibles universos con leyes distintas al nuestro. En otras palabras: cada espacio de Calabi-Yau se corresponde con un falso vacío de la teoría. Para cada falso vacío tenemos un universo con leyes distintas. La estimación que se suele dar para el número de falsos vacíos posibles es de 10^{600} , que es casi inimaginable. Algunos físicos lo han usado para criticar la teoría, diciendo que, más que una «teoría del todo» es una teoría de «todo lo que uno quiera».

Tenemos ahora todos los ingredientes necesarios para explicar cómo la teoría de cuerdas, junto con la inflación caótica, da lugar a un multiverso en el que cada universo-burbuja tiene unas leyes de la física distintas. Nuestro universo empieza en un estado de alta energía, en la parte alta de la curva de la figura 3 (pág. 79). Desde ahí, empieza a expandirse de forma exponencial y algunas de sus regiones se mueven a energías inferiores, dando lugar a universos-burbuja con sus propios valores para las constantes físicas. A medida que el universo se expande, se crean más y más universos-burbuja, cada uno con unas constantes físicas distintas. Es incluso posible tener una burbuja dentro de una burbuja y así sucesivamente, en una estructura fractal que no es observable, debido a que los tamaños de los universos-burbuja hacen que un observador dentro de estos nunca tenga acceso al exterior.

La situación es aún más caótica: la teoría de cuerdas permite que dentro de un universo-burbuja haya distintas regiones con distintos valores de las constantes: por ejemplo, podría haber lugares en nuestro universo, mucho más allá de la región observable, donde la constante cosmológica fuese mayor o menor. Como Andréi Linde explica en su artículo «Cosmología inflacionaria después de Planck 2013», muchas de las características de nuestro mundo no vienen determinadas por los valores iniciales de las constantes físicas, sino por los valores de aquellas que cambian en el tiempo, lo que introduce aún más variables a la hora de calcular el número de universos posibles. Linde llega a una estimación del número de universos potenciales de $10^{10^{975}}$, un número tan enorme que, si no lo expresamos en potencias, no cabría en esta página. Según Linde, esto da una justificación científica al principio antrópico, que ya no se ve obligado a postular la existencia de todos los universos posibles puesto que surgen de una teoría con gran aceptación como es la inflación caótica.

El principio antrópico es útil porque suaviza los requerimientos de una teoría del todo. No hace falta que prediga que nuestro universo es el único posible: solo necesita predecir que nues-

FIG. 8



El ejemplo de representación del espacio de Calabi-Yau juega un importante papel en la teoría de cuerdas.

tro universo es uno de los posibles. Una vez se da este hecho, la inflación cósmica garantiza que ese universo existirá, explicando por qué nuestro universo tiene unas características que parecen diseñadas para acomodar la vida: existe un número inimaginable de universos y nos encontramos en uno de los pocos que son compatibles con nuestra existencia.

¿POR QUÉ TIENE NUESTRO UNIVERSO TRES DIMENSIONES ESPACIALES?

La teoría de cuerdas, junto con el principio antrópico, puede usarse también para explicar por qué nuestro universo tiene cuatro dimensiones, tres de las cuales son de espacio, lo que hasta la fecha tenía que aceptarse como un hecho bruto. Resulta que, en la teoría de cuerdas, los estados con cuatro dimensiones «grandes» y seis compactificadas son o bien inestables o bien metaestables: es decir, tienden a decaer produciendo o bien burbujas de un espacio que se colapsa sobre sí mismo o bien un espacio plano de diez dimensiones. ¿Por qué nos encontramos entonces en un espacio de tres dimensiones, cuando la naturaleza prefiere diez o ninguna?

La respuesta está, de nuevo, en el principio antrópico. Resulta que los humanos no podríamos existir en un espacio de dos dimensiones: para entender por qué, basta pensar por un momento qué tipo de sistema digestivo podría tener un animal bidimensional. Obviamente, ninguno: un tubo que pasase por en medio lo cortaría en dos. Así pues, es imposible formar estructuras de la complejidad suficiente en dos dimensiones.

Si las dimensiones del espacio fueran más de tres, la gravedad no decrecería con la distancia al cuadrado, sino que lo haría más rápido. Una forma de entender esto es pensar que, en tres dimensiones, la fuerza gravitatoria se reparte por la superficie de una esfera, que aumenta con el cuadrado del radio; en cuatro dimensiones, la superficie sería la de una *hiperesfera*, que aumenta con el cubo del radio. Debido a este hecho, no podrían existir órbitas planetarias estables, así que no estaríamos ahí para contarlos. Lo

CALCULANDO LA FUERZA GRAVITATORIA EN OTRAS DIMENSIONES

La fórmula de Newton para el campo gravitatorio se puede deducir teniendo en cuenta que la fuerza es transmitida por *gravitones*, partículas hipotéticas que aun no han sido detectadas experimentalmente. Supongamos que esa fuerza es proporcional al número de gravitones que alcanzan un cuerpo: en este caso, el campo gravitatorio será más débil cuanto más lejos nos encontremos del centro, porque los gravitones estarán más diluidos. De forma más específica, los gravitones se distribuyen por una esfera cuya superficie es $4\pi r^2$. Dado que el campo será también proporcional a la masa y añadiendo una constante arbitraria, obtenemos:

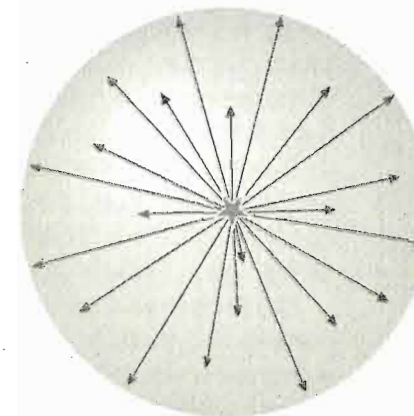
$$g = k \frac{M}{4\pi r^2} = G \frac{M}{r^2},$$

donde hemos bautizado como G a la combinación de nuestra constante y 4π . En un espacio de dos dimensiones, los gravitones no se distribuyen por la superficie de una esfera, sino por el perímetro de un círculo. Por lo tanto, obtendremos un campo gravitatorio que disminuye con r , no con r^2 . De forma similar, en cuatro dimensiones los gravitones se distribuyen por la superficie de una hiperesfera, cuya superficie aumenta con el cubo de r y no con su cuadrado. Si aplicamos este razonamiento de manera más general, podemos deducir que la intensidad del campo gravitatorio, en un espacio de N dimensiones, vendrá dada por:

$$g = G \frac{M}{r^{N-1}}.$$

Debido a que las órbitas estables solo son posibles cuando la intensidad decrece con el cuadrado de r , cualquier universo con más o menos dimensiones que tres no podría haber dado lugar a planetas que soportasen la vida.

Los gravitones se distribuyen sobre una esfera alrededor de su fuente, en este caso una estrella. La superficie de una esfera es igual a $4\pi r^2$.



mismo se da para las órbitas de los electrones en un átomo: una dimensión mayor que cuatro hace que sean inestables, con lo cual no habría química ni vida.

Por suerte, la teoría de cuerdas no tiene por qué predecir que un espacio de tres dimensiones es necesario: de eso se encarga el principio antrópico. La teoría de cuerdas tiene suficiente, como dice Linde, con mostrar que un espacio de tres dimensiones es posible. En este sentido, la teoría de cuerdas puede dar cuenta de un hecho que, de otra forma, parecería otra coincidencia imposible de explicar.

LA POTENCIA DEL RAZONAMIENTO ANTRÓPICO

Como se ha visto, el principio antrópico por sí mismo no es muy potente, sino que adquiere su potencia explicativa cuando la teoría que describe nuestro universo predice también un multiverso. A pesar de que la idea del multiverso dista mucho de ser aceptada por toda la comunidad científica, el éxito predictivo del modelo inflacionario, en particular sobre las fluctuaciones en el fondo cósmico de microondas, está obligando a cada vez más físicos a tomárselo en serio. Una vez aceptada la necesidad de un multiverso, el principio antrópico hace su entrada triunfal: puede seleccionar, entre todos los universos predichos por la teoría, aquellos en los que sus características son compatibles con la presencia de observadores. El principio antrópico no solo logra dar una explicación plausible para el sorprendente valor de la constante cosmológica, sino que proporciona respuestas a preguntas como por qué nuestro espacio tiene las dimensiones que tiene, que hace medio siglo hubieran sido consideradas en el terreno de la metafísica o de la religión.

El principio antrópico no es acientífico, aunque tampoco forme parte de la ciencia: es una forma de razonar que ayuda a la ciencia a responder preguntas que antes formaban parte de la metafísica. En este sentido, es el último empujón que la ciencia necesita para encontrar una explicación satisfactoria a las características de nuestro universo.

¿Es real nuestro universo?

El desarrollo exponencial de la tecnología ha llevado a físicos y filósofos a plantearse la posibilidad de que nuestra realidad sea una simulación. Si aceptamos esa idea, una nueva infinitud de universos se une a los ya predichos por la teoría de cuerdas.

La película *The Matrix*, estrenada en 1999, popularizó la idea de que el mundo que observamos podría no ser real. No era la primera vez: tres siglos antes, el filósofo francés René Descartes (1596-1650) ya había sugerido algo similar. Descartes utilizó la idea de que existe un genio maligno que se dedica a hacernos creer que existe una realidad externa a nosotros para deducir lo que él consideraba verdades «claras y distintas», es decir, afirmaciones que son ciertas con seguridad, a pesar de los esfuerzos del genio por confundirnos.

En *The Matrix*, humanos de carne y hueso están conectados a un gran entorno de realidad virtual basado en el siglo xx, donde creen haber nacido. *Matrix* podría ir un paso más allá: ¿por qué humanos de carne y hueso? ¿Por qué no humanos virtuales? ¿Es posible simular la mente de un ser humano dentro de un ordenador lo suficientemente potente?

Antes de responder a esta pregunta, debemos pararnos a considerar qué significa esto exactamente. Supongamos que somos una persona simulada del siglo xxi. ¿Qué sentiremos? ¿Qué diferencia habrá entre nuestra percepción y la de una persona real del siglo xxi?

La respuesta es que, si la simulación es lo suficientemente precisa, no tendría que haber ninguna. Nuestra realidad estaría generada por unos y ceros, pero esos unos y ceros descri-

birían el comportamiento de todas las partículas a nuestro alrededor. Tendríamos un cuerpo virtual, hecho de átomos virtuales, con protones y electrones virtuales. Nuestro pensamiento sería el resultado de la interacción de esas partículas simuladas. Nuestra comida sería idéntica a la que disfrutaría una persona en el siglo XXI real, con la única diferencia

que los átomos y moléculas que la formarían serían virtuales. Es decir: un observador dentro de una simulación no puede ser consciente de ello, si la simulación es lo suficientemente precisa. De hecho, ni siquiera hace falta ir tan lejos: bastaría con algo que reprodujese nuestro día a día con la suficiente exactitud para que creyésemos que vivimos en una realidad «real». Detalles como nuestra composición atómica pueden ser ignorados perfectamente en la gran mayoría de situaciones cotidianas. Al fin y al cabo, la mayor parte de la gente no se dedica a realizar experimentos con partículas subatómicas, sino que solo lee acerca de ellos en la prensa.

OBSERVADORES ARTIFICIALES

¿Son posibles los observadores artificiales? A pesar de que algunos científicos responderían negativamente a la pregunta, la balanza se inclina cada vez más hacia el lado del sí. Esto se debe a los espectaculares avances en inteligencia artificial que se han dado durante la segunda década del siglo XXI: hoy en día existen algoritmos que son capaces de saber qué hay en una foto con más porcentaje de acierto que un humano, por poner un ejemplo. Tan solo diez años atrás esto parecía más propio de la ciencia ficción.

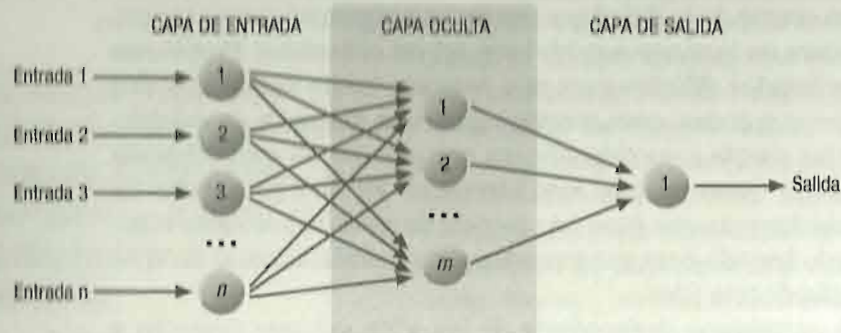
A finales del siglo XX existía un gran escepticismo entre los expertos en inteligencia artificial. Este escepticismo surgió al darse cuenta de lo difícil que resultaba programar ciertas tareas, que para un humano son triviales, en un ordenador. Problemas considerados difíciles para una persona, como multiplicar dos números grandes, eran sencillos para una máquina; en cambio, algo tan simple como identificar a una persona en una fotografía se reveló como un gran reto ingenieril. Es fácil programar un ordenador para que gane una partida de ajedrez, pero muy complicado hacerlo para que mantenga una conversación al nivel de un niño de tres años.

El entusiasmo desbordante de los años ochenta respecto a la inteligencia artificial llevó a la inevitable decepción, que a su vez llevó a la mayoría de expertos en la materia a afirmar cosas como que la primera inteligencia artificial capaz de mantener una conversación estaba a doscientos años vista. Incluso hoy en día, a pesar de los inmensos éxitos cosechados durante los últimos años, hay una tendencia a no realizar afirmaciones grandilocuentes, por miedo a caer en las promesas incumplidas de los años sesenta.

A pesar de todo, el progreso en inteligencia artificial es innegable y parece estar acelerándose. Un artículo de *The New York Times* de 1997 afirmaba que el juego del go (un juego estratégico chino ideado hace 2500 años) era tan intuitivo, tan humano, que sería imposible que una máquina jugase bien antes de al menos dos siglos. Sin embargo, en marzo de 2016, el programa AlphaGo de Google vencía al campeón mundial, Lee Sedol (n. 1983) en cuatro de los cinco juegos que compusieron el partido. Lo que resulta más inquietante de todo esto es que AlphaGo no fue programado para jugar al go, sino que aprendió por sí solo, primero mirando un sinfín de partidas de go y luego jugando partidas contra sí mismo.

AlphaGo forma parte de un nuevo tipo de programas basados en *redes neuronales* (figura 1), estructuras que copian el funcionamiento de nuestro cerebro en su forma de aprender. Las redes neuronales se han usado para programar AlphaGo, así como para hacer que el programa Watson de IBM ganase el concurso

FIG. 1



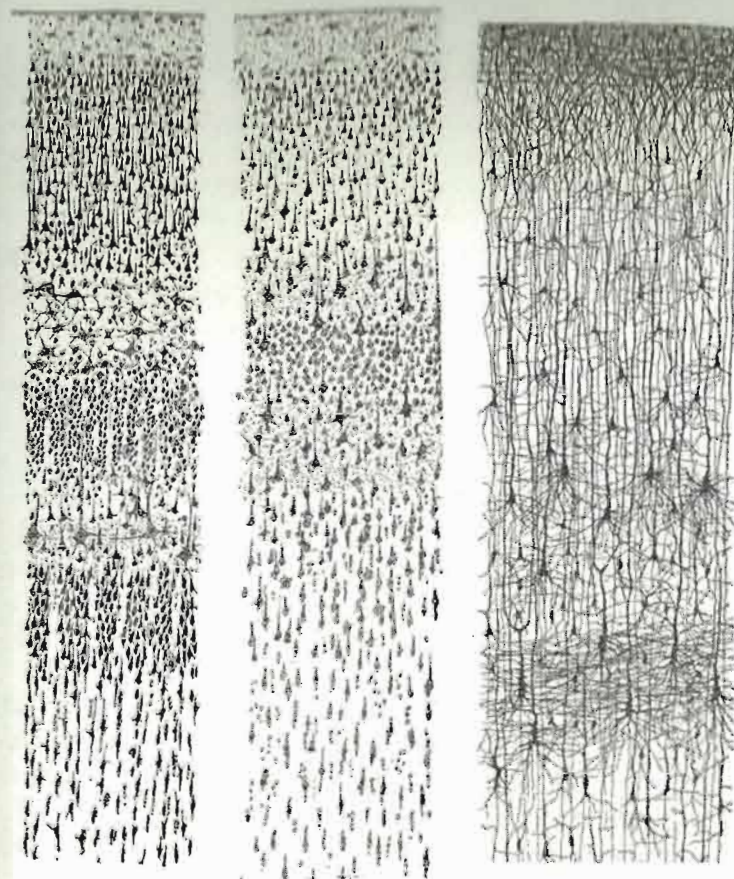
Un ejemplo de red neuronal. Esta consiste en varias capas de neuronas. La primera recibe los impulsos de entrada, como por ejemplo los píxeles de una fotografía. Cada capa realiza un proceso distinto sobre esa información hasta llegar a la neurona de salida que nos dice, por ejemplo, si esa imagen es una persona o un gato.

americano *Jeopardy!* o, por ejemplo, para el reconocimiento de imágenes. En marzo de 2016, Google publicó una serie de algoritmos capaces de saber dónde ha sido tomada una imagen con solo analizarla, algo que está muy por encima de las capacidades de una persona cualquiera.

Además de las aplicaciones comerciales, tenemos la investigación científica. El propósito de las redes neuronales de Google y Microsoft es la resolución de problemas comerciales, no la comprensión del cerebro humano. Por otro lado, hay varios proyectos en marcha cuyo objetivo declarado es simular el cerebro humano en un ordenador.

El más ambicioso es el *Blue Brain Project*, una iniciativa europea cuyo objetivo final es simular el cerebro de un mamífero en un ordenador a escala molecular: es decir, sin ignorar detalles finos que pueden no ser relevantes para el proceso de información, pero que sí lo resultarán para dar con tratamientos para enfermedades del cerebro como el Alzheimer. Para ello, el equipo investigador se ha centrado primero en simular algo llamado una *columna cortical*, (en la figura 2, varias de ellas dibujadas por Ramón y Cajal en 1899) considerada como la menor unidad

FIG. 2



Dibujos de Ramón y Cajal de columnas corticales, donde se pueden apreciar las distintas neuronas y sus conexiones. Una de ellas fue ya simulada en 2007.

funcional en el cerebro. La columna cortical tiene unas 60 000 neuronas en humanos y 10 000 en ratas y su simulación se logró en 2007. La segunda fase consistirá en poner esas columnas conjuntas para lograr simular un neurocortex entero, primero de una rata, luego de un gato, seguidamente de primates y finalmen-

CÓMO FUNCIONA ALPHAGO

El programa AlphaGo de Google es un prodigio de la inteligencia artificial. Posee dos «cerebros» con funciones distintas: uno de ellos se encarga de sugerir el siguiente movimiento, mientras que el otro emite un juicio de valor sobre la probabilidad de que esa estrategia acabe en victoria. A esos cerebros se les llama «cerebro de políticas» y «cerebro de evaluaciones», respectivamente. Cada uno de ellos es una red neuronal, muy parecida a las que se usan para el reconocimiento de imágenes. En el caso del cerebro de políticas, las primeras capas se dedican a encontrar patrones, es decir, a leer la tabla de go. Después, usan la información obtenida para realizar sugerencias sobre el siguiente movimiento.

Ciberdecisiones de gran potencial

Una característica sorprendente de AlphaGo es que nadie sabe exactamente cómo llega a tomar sus decisiones. La red neuronal se ha entrenado primero mirando millones de partidas entre humanos y luego jugando contra sí misma. En particular, los ingenieros de Google pusieron a la versión más potente de AlphaGo a jugar contra versiones anteriores, hasta que aprendió a seleccionar las mejores jugadas. Una vez realizada su sugerencia, el cerebro de evaluaciones realiza simulaciones hacia el futuro para decidir la probabilidad de que ese movimiento acabe en victoria. Es la combinación de ambas redes neuronales la que da a AlphaGo su potencia.

El cerebro de evaluaciones ve la tabla tal como se representa en la imagen. Las celdas más oscuras representan posiciones con más probabilidad de conducir a una victoria.

te de un humano. Su director, el neurólogo Henry Markram (n. 1962), espera haber logrado la simulación de un cerebro humano antes de 2019.

La posibilidad de simular un cerebro humano, sea a veinte o a cien años vista, parece difícil de discutir. Eso implica que una cantidad significativa de observadores no reside en universos físicos como el nuestro, sino que lo hace en universos virtuales, donde leyes de la física virtuales se aplican a escenarios virtuales, pero donde los seres dentro de la simulación no saben que están en una de ellas. El principio antrópico no distingue entre observadores virtuales y reales, así que debemos tener en cuenta también a los observadores simulados cuando tratamos de hacer predicciones antrópicas. Esto, como se verá, causa un sinfín de problemas a la hora de hacer cálculos de probabilidad, y tiene una serie de consecuencias que son, como poco, difíciles de aceptar.

¿Cuántos observadores son simulados?

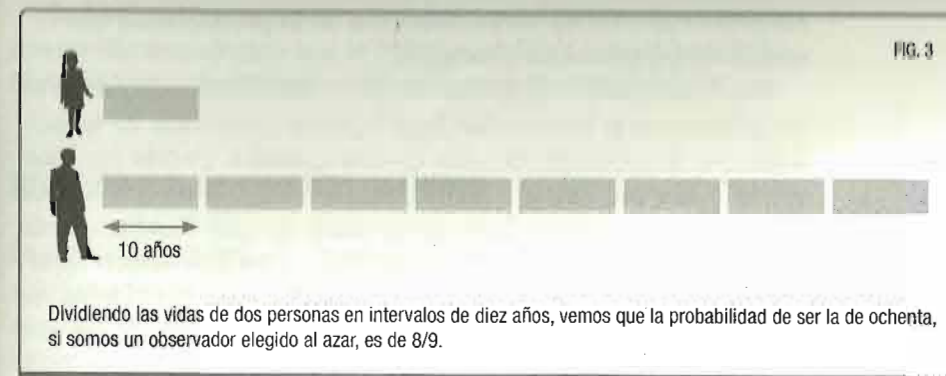
Una vez aceptada la posibilidad de que algunos observadores sean simulados, podemos empezar a calcular qué proporción de ellos lo será. El problema es que estimar algo así es prácticamente imposible, porque no tenemos suficiente información: ¿hasta qué profundidad de detalle puede llegar una simulación? ¿Es posible simular un universo entero? ¿Y una parte? ¿Y si nos limitamos a una persona y sus percepciones inmediatas? Ninguna de esas preguntas tiene por ahora respuesta, así que todo lo que podemos hacer es quedarnos con algo que nos parezca mínimamente razonable. Por desgracia, estas son preguntas que tampoco podemos permitirnos el lujo de ignorar: si los observadores virtuales son posibles, su existencia tiene consecuencias drásticas sobre las predicciones que podemos hacer usando el principio antrópico. Sin embargo, es importante recalcar que los argumentos que se darán a continuación no son científicos, en el sentido de que, a pesar de que algunas de las estimaciones que se realizarán están basadas en leyes físicas, no podemos tomarnos

esos números muy en serio debido a la gran incertidumbre en el número de observadores simulados.

Empecemos por un caso sencillo y centrémonos solo en este universo. De hecho, podemos ir incluso más allá e ignorar cualquier vida inteligente que no exista en la Tierra. Nos preguntamos ahora sobre qué probabilidad tenemos de ser, nosotros mismos, seres humanos simulados.

Para estimar esta probabilidad debemos usar el principio de automuestreo, es decir, debemos suponer que somos un observador elegido aleatoriamente de entre todos los posibles. En este caso, hay dos aspectos a tener en cuenta: por un lado, tenemos que averiguar el tamaño de nuestra clase, es decir, cuántos humanos hay. Por otro, hay que tener en cuenta el tiempo de vida de cada humano: pongamos que solo hay dos humanos en el universo. Uno vive diez años y el otro ochenta. Podemos ahora dividir la consciencia de cada uno en intervalos de diez años (figura 3): claramente, el humano de ochenta años posee más intervalos. Por consiguiente, si partimos de la base de que somos un observador escogido aleatoriamente, tendremos que concluir que es más probable que seamos el humano de ochenta años, ya que ha vivido más tiempo. Es posible imaginarlo de esta forma: cada uno de esos intervalos corresponde a una bola numerada que depositamos en una urna. Si escogemos una bola cualquiera, esperaremos que sea la más probable, que corresponderá al humano de ochenta años.

Para hacernos una idea del tamaño y número de simulaciones que una civilización mucho más avanzada que la nuestra podría llevar a cabo, usaremos límites teóricos actuales sobre el número de operaciones por segundo que se pueden realizar en un espacio determinado. Esos límites están basados en resultados de computación cuántica que van más allá del ámbito de este libro, pero se pueden entender en términos del principio de indeterminación: este introduce una «granularidad» en el espacio que impide tener unidades de proceso infinitamente pequeñas. El físico estadounidense Seth Lloyd (n. 1960), profesor en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT, por sus siglas en inglés), calcula que un kilogramo de materia es capaz de realizar, como



máximo, 10^{51} operaciones por segundo. Se estima que el número de operaciones requeridas para simular un cerebro humano es de entre 10^{14} y 10^{17} bits por segundo, según se tengan en cuenta o no ciertos mecanismos moleculares. Hoy en día, un ordenador de sobremesa ejecuta unas 10^{10} operaciones por segundo, entre una diezmilésima y una millonésima parte de las que realiza una persona.

Si comparamos el número estimado por Lloyd y tomamos la máxima capacidad de un ser humano, obtenemos:

$$\frac{10^{51}}{10^{17}} = 10^{34}.$$

Dado que hoy en día existen unos siete mil millones de personas, aproximadamente 10^{10} , vemos que con un kilogramo de materia tendría que ser posible simular la totalidad de la gente que vive hoy en nuestro planeta, un billón de veces. Es decir: una civilización lo suficientemente avanzada no tendría problema alguno en simular la época en la que vivimos y, de hecho, podría hacerlo billones de veces usando el equivalente de un ordenador portátil.

El cálculo anterior nos da una idea del número y la extensión de las simulaciones que una civilización avanzada podría llevar a cabo. Como se puede ver, se trata de un número enorme, dado el límite en la potencia de cálculo de un kilogramo de materia. Esto

resultará clave en nuestra estimación de la probabilidad que tenemos de ser personas simuladas.

Nos faltan ahora dos piezas claves de información: la primera, no sabemos si la humanidad llegará jamás a las cotas de tecnología que le permitan simular épocas pasadas. Podría ser, por ejemplo, que nos extinguiésemos mucho antes. Si eso sucede, la probabilidad de ser una persona simulada es cero. También sería posible que ninguna de las civilizaciones a las que demos lugar en un futuro tenga interés alguno en simular distintas épocas en su evolución: sin embargo, solo con que una persona futura decidiese simular el siglo **xxi**, habría tantos observadores en el siglo **xxi** real como en el simulado. Si hubiera dos, tendríamos una probabilidad de dos tercios de ser humanos simulados. Es decir, el desinterés por simular civilizaciones pasadas tendría que ser absoluto porque un solo individuo interesado podría llevar a cabo millones de simulaciones con muy pocos recursos.

Tenemos ya todos los elementos para seguir el argumento de la simulación de Nick Boström, quien sostiene que una de las tres siguientes afirmaciones es cierta:

1. Es muy probable que la especie humana se extinga antes de llegar a un estado avanzado de civilización.
2. Toda civilización avanzada que se derive de la nuestra será muy reacia a ejecutar simulaciones del pasado.
3. Vivimos casi con certeza en una simulación.

El argumento de Boström parece de ciencia ficción, pero no lo es. Si nuestra civilización llega a un estado en el que es capaz de simular el siglo **xxi** y no existe algún tipo de prohibición respecto a simular épocas pasadas, acabarán por existir incontables simulaciones del siglo **xxi**. Por lo tanto, habrá muchos más habitantes simulados del siglo **xxi** que reales. Si aceptamos que somos un observador elegido aleatoriamente entre todos los posibles, se sigue que, con una probabilidad casi igual a uno, formamos parte de una simulación.

Es decir: o bien la especie humana nunca llega a un estado de desarrollo tecnológico que le permita simular épocas pasadas o bien, con casi absoluta certeza, vivimos en una simulación.

BOSTRÖM Y EL MULTIVERSO CUÁNTICO

Como acabamos de ver, el razonamiento antrópico puede llevar a conclusiones aparentemente absurdas o, al menos, difíciles de aceptar. La situación se complica aún más cuando incorporamos el multiverso a nuestro razonamiento. Empezaremos por el multiverso de la mecánica cuántica y lo expandiremos luego al paisaje de la teoría de cuerdas.

El argumento anterior de Boström suena preocupante cuando suponemos que solo hay un universo. Resulta mucho peor si consideramos el multiverso cuántico, donde toda posibilidad se da. La razón para ello es que dos de las afirmaciones se vuelven completamente irrelevantes y obtenemos, directamente, que vivimos en una simulación con certeza absoluta.

La modificación del argumento de Boström es sencilla: en el multiverso cuántico, cualquier posibilidad física acaba por darse. Por consiguiente, tenemos asegurado que la humanidad llegue a un estado en el que será capaz de simular épocas pasadas. De forma similar, tiene que existir al menos una rama del multiverso en el que la humanidad tome la decisión de simular estados pasados de su evolución, por la sencilla razón de que todo lo físicamente posible acaba por suceder. Las dos primeras posibilidades quedan descartadas, de forma que solo puede darse la tercera.

Este tipo de razonamiento muestra las dificultades que uno tiene en el momento en el que acepta la teoría del multiverso. No solo es difícil contar universos, dado el enorme número de posibilidades que existen; además, surgen otras posibilidades como los universos falsos que hacen cualquier estimación cuantitativa casi imposible. Las dificultades a la hora de contar universos y asignar probabilidades a cada uno de ellos son mencionadas con frecuencia por los críticos de la teoría de múltiples universos; la existencia de observadores simulados complica aún más la situación.

Hasta ahora nos hemos limitado a considerar la civilización terrestre y nuestro universo, ignorando el multiverso que surge a causa de la inflación eterna. Como veremos, una vez aceptamos la posibilidad de simular universos enteros, su número y variedad se dispara hasta tal punto que el principio antrópico pierde toda capacidad predictiva.

Recordemos que, en la teoría de la inflación eterna, un universo en expansión exponencial da lugar a un sinnúmero de universos-burbuja con leyes distintas de la física. El principio antrópico nos dice que tendríamos que encontrarnos en uno de los pocos que son compatibles con la existencia de observadores inteligentes.

El multiverso de la inflación es mucho mayor que el de la mecánica cuántica: no solo se dan todas las posibilidades físicas para unas leyes determinadas, sino que además se dan todas las leyes posibles que puedan surgir al romperse la simetría original de la teoría de cuerdas.

La idea del multiverso es usada con frecuencia para atacar argumentos teístas. Estos se suelen basar en la idea de que el ajuste fino de las constantes es una prueba de la existencia de Dios: dado que el universo parece diseñado para la vida, ¿por qué no aceptar que hay un diseñador? Otra forma de enfocar la misma cuestión es plantearse por qué nuestro universo tiene estas leyes de la física y no otras. La respuesta de un científico religioso es simple: son las leyes que Dios ha elegido, con el objetivo de crear a la humanidad.

La mayoría de físicos no está cómoda con esta clase de razonamientos, pero es difícil negar que el ajuste fino de las constantes es un hecho que requiere explicación. La idea de que las leyes son las que son y no hay más que hablar puede parecer satisfactoria para algunos, pero en un debate enfocado al gran público es probable que este se decante por la atracción intuitiva que presenta la hipótesis divina.

El multiverso proporciona un argumento mucho más científico sobre por qué las leyes del universo son compatibles con la vida. No necesitamos a dios alguno: nuestras teorías predicen una multiplicidad de universos y nos encontramos en uno de los

que pueden albergar vida. La necesidad de un creador ha sido eliminada.

Paul Davies era consciente de eso mientras se dirigía a un debate sobre Dios y la ciencia con el químico británico y ateo confeso Peter Atkins (n. 1940). Davies buscaba un argumento que debilitase la idea del multiverso hasta llevarla al absurdo: fue entonces cuando dio con la idea de los universos falsos. Davies argumenta que, si uno acepta la existencia del multiverso de la física cuántica, se ve obligado a aceptar la existencia de una multitud de universos simulados. Estos universos falsos son mucho más baratos que los reales: la computación requiere energía, pero mucha menos que la que se necesita para crear materia para un universo entero. Así pues, cabría esperar que, por cada universo real que contuviera una civilización avanzada, habría cientos o miles de universos falsos que harían lo propio. Además, decía Davies, si un universo simulado era lo suficientemente detallado para permitir computaciones en él, podría a su vez albergar civilizaciones que simularan otros universos, y así *ad infinitum*.

El problema de los universos falsos es que quitan toda capacidad predictiva al multiverso. Dado que existe una cantidad mucho mayor de universos falsos que de universos reales, uno se ve obligado a aceptar que, casi con total seguridad, se encuentra en uno de los primeros. Pero si eso es así, ¿quién nos asegura que nuestras leyes de la física tienen algo que ver con las del universo desde donde nos están simulando? Una especie lo suficientemente avanzada podría simular universos de todo tipo, no solo parecidos al suyo. Así pues, uno esperaría que hubiese un gran número de universos falsos con una gran cantidad de leyes que vendrían dadas por la creatividad de la civilización que las produjese, no por las leyes reales de la física, sean las que sean.

Como puede verse, esto conduce a serios problemas. Si aceptamos el principio antrópico, llegamos a la conclusión de que vivimos en un universo simulado. Pero, si eso es así, todo lo que los físicos están encontrando son las leyes del universo simulado, que no tienen por qué coincidir con las reales. No solo eso: dado que vivimos en una simulación, las leyes podrían cambiar en cualquier momento. De hecho, quien sea que nos está simulando

podría decidir parar la simulación, destruyendo nuestro universo. Por si fuera poco, también existe la posibilidad de que nuestro universo solo haya existido durante cinco minutos o cinco segundos: ¿por qué empezar la simulación en el Big Bang? ¿Por qué no hacerlo en un momento cualquiera y pararla en cualquier otro?

Parece difícil evitar la conclusión de que el actual estado del universo ha sido «escogido» o seleccionado entre un enorme número de posibles estados, todos ellos desordenados a excepción de una parte infinitesimal.

PAUL DAVIES

nunca descubrirá nada relevante sobre nuestro universo, porque niega su existencia.

Aceptar la existencia de universos falsos implica, como se ha visto, una serie de consecuencias que no solo ponen en dificultades la idea del multiverso, sino la misma empresa científica. La ciencia tiene que suponer que el mundo se rige por leyes cognoscibles para avanzar: sin esa premisa, no hay nada que hacer. En el momento en el que aceptamos que prácticamente todo vale, dejamos de tener razón alguna para continuar haciendo ciencia. Así pues, uno se ve obligado o bien a abandonar la idea del multiverso, o bien a dejar de hacer ciencia, o a argumentar que, quizá, hay algo en las leyes de nuestro multiverso que impide la simulación a gran escala de otros universos. Ninguna de las opciones es ideal.

Dioses y superdioses

En su libro *El enigma de ricitos de oro*, Paul Davies sugiere otra forma en la que los universos falsos crean problemas para la físi-

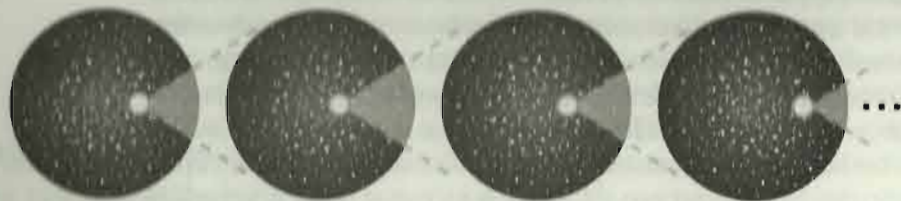
ca: la existencia de una infinidad de dioses de todo tipo. Davies argumenta de la siguiente forma: un dios no es más que una inteligencia que ha creado el universo. En este sentido, cualquier científico de una civilización avanzada que haya simulado un universo es un dios, según esa definición. Además, añade, ese dios tendría que ser capaz de modificar la simulación a su antojo, añadiendo hechos que parezcan ir contra sus mismas leyes, por ejemplo. Dado que tendría acceso a todos los aspectos de la simulación, tendría también que ser capaz de leer los pensamientos de los seres que viviesen en ella y de responderles en la manera en la que eligiese. Es decir: tendríamos un creador del universo que sería capaz de realizar milagros y responder a plegarias.

Davies no se queda ahí: sugiere que casi todos los tipos de dioses concebibles son reales. Por ejemplo, podríamos tener una simulación de la que son responsables varias personas a la vez, lo que daría lugar a un panteón politeísta; también podría ser que esos responsables estuvieran en directa competencia y trataran de llevar la simulación según sus propios deseos, de forma parecida a las luchas cainitas entre dioses de la mitología griega.

Además de dioses habría, siempre según Davies, superdioses: los dioses de un universo podrían ser parte de una simulación con sus propios dioses y así las veces que hiciera falta. Tendríamos entonces una jerarquía de dioses, cada uno en un nivel más alto de la simulación.

Davies para en este punto, pero podría ir más lejos: por ejemplo, podríamos tener un universo donde una de las sucesivas simulaciones resultase idéntica al universo original, en una estructura parecida a la de una serpiente mordiendo la cola (figura 4). En este caso, los dioses de un universo serían creados por sus propias criaturas. También puede ser que un gran número de realidades simuladas sean idénticas a un universo real. Una vez abierta la caja de Pandora, prácticamente todo es posible.

Toda la sección anterior puede parecer delirante. El problema es que, si queremos tomarnos en serio la teoría del multiverso, hay que poder dar respuesta a este tipo de objeciones, por absurdas que sean. Si nuestra teoría tiene como consecuencia lógica una infinidad de universos falsos junto con ejércitos de



Universos simulando otros universos: una pequeña región del primer universo (izquierda) simula otro universo, una región del cual simula otro universo y así sucesivamente.

deidades, quizá deberíamos abandonarla. Si no, tenemos que encontrar una forma de eliminar todas esas realidades alternativas que hacen predicciones surrealistas. Otra posibilidad es, por supuesto, tragarse el sapo y admitir la posibilidad de universos falsos pero imponer alguna clase de restricción sobre ellos. Por ejemplo, podemos argumentar que la capacidad de proceso disponible de un universo al siguiente disminuye debido a que es imposible usar los recursos energéticos con un cien por cien de eficiencia. Debido a esto, el número de regiones reales del multiverso será mucho mayor que el número de regiones falsas, con lo cual tenemos prácticamente asegurado encontrarnos en un universo real. Esto elimina el problema de los universos falsos y deja intacta la posibilidad del multiverso. Sin embargo, se trata, de nuevo, de un argumento especulativo. Mientras no sepamos cómo calcular probabilidades en conjuntos infinitos de universos, toda la discusión anterior quedará fuera de la ciencia.

¿QUÉ SIGNIFICA SER «REAL»?

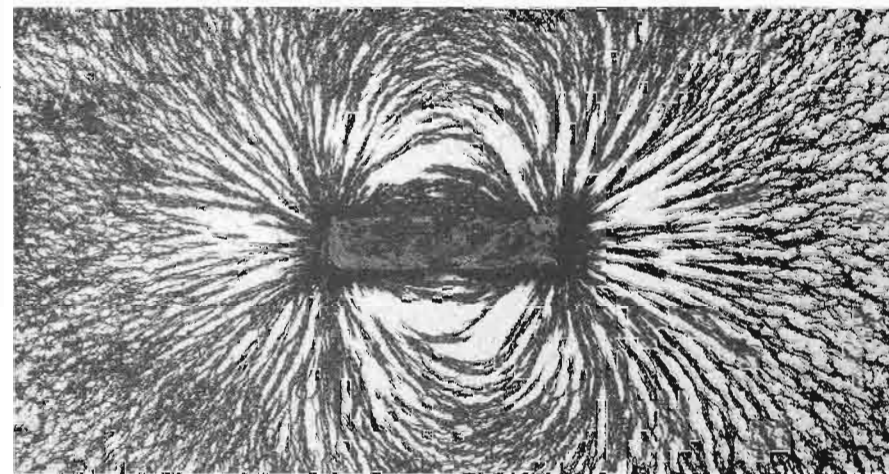
La sección anterior introduce una cuestión interesante: si no podemos distinguir entre un universo simulado y uno real ¿existe alguna diferencia entre ellos? Lo primero que uno piensa es que tiene que haberla: un universo simulado es solo un proceso abstracto de información, mientras que nuestro universo tiene

solidez, se puede tocar. Todos sabemos lo que eso significa: una manzana es tangible; un pensamiento no lo es.

Sin embargo, cuanto más averiguamos sobre las leyes de la física, más se evapora esta idea de solidez. Hoy en día sabemos que, al tocar una manzana, nunca llegamos a tener contacto: lo que notamos es la repulsión entre los electrones de la capa más externa de nuestros átomos y los de la manzana. Nuestra idea de solidez es un concepto útil para la supervivencia, pero que no tiene por qué tener relevancia alguna en el universo en sí.

El modelo estándar se basa en la idea de algo llamado *campo*, un objeto matemático abstracto que ocupa la totalidad del espacio, como una manta. Hay distintos tipos de campo: algunos de ellos dan lugar a fuerzas, como el campo magnético (figura 5) o el gravitatorio; otros dan lugar a partículas con masa, como el *campo de Dirac*, del que surgen los electrones. Las partículas no son más que perturbaciones en esos campos, equivalentes a una pequeña onda viajando por la manta. ¿Qué determina qué cam-

FIG. 5



El campo magnético de un imán se puede detectar usando limaduras de hierro. Se extiende por todo el espacio, aunque a distancias muy grandes deja de ser detectable.

LOS CUATRO NIVELES DEL MULTIVERSO DE TEGMARK

Max Tegmark es uno de los más fervientes defensores del multiverso. Según él, algunas versiones del multiverso son prácticamente aceptadas por todo el mundo, mientras que otras entran de lleno en el terreno de la especulación. Tegmark clasifica los diferentes tipos de multiverso en cuatro niveles, según la variedad de universos a la que dan lugar.

Un universo plano

En primer lugar, se encuentra el multiverso que se deriva de la planitud de nuestro universo: si el espacio es plano, tiene una extensión infinita, lo que significa que todas las posibilidades tienen que darse en él. Según Tegmark, la existencia de este nivel de multiverso está prácticamente asegurada por los resultados experimentales.

Expansión ultrarrápida: universos-burbuja

El segundo nivel es el asociado a la teoría de la inflación caótica. En este caso, tenemos un número enorme de universos-burbuja, como muestra la figura 1, cada uno con sus leyes de la física. Si a esto le añadimos la idea del paisaje de cuerdas, obtenemos una cantidad aún mayor de posibilidades. Este nivel del multiverso tiene detractores, pero goza de buena salud entre la comunidad física.

El multiverso según Hugh Everett

El tercer nivel de multiverso es el de la mecánica cuántica de Everett. Este deriva del desdoblamiento de la función de onda cada vez que se realiza una medida cuántica. Da lugar a una serie de historias alternativas, pero no puede crear universos con leyes distintas al nuestro. Curiosamente, este nivel de multiverso es más polémico que el segundo, a pesar de que da lugar a una variedad mucho menor.

Matemáticas cósmicas

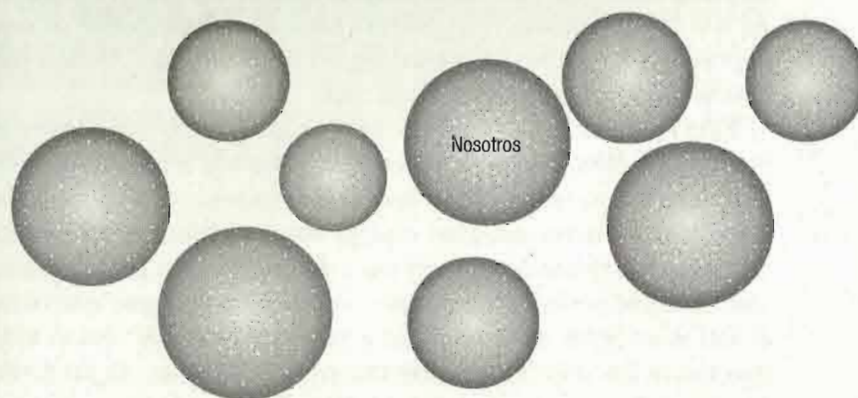
Max Tegmark propone aún otro nivel de multiverso, que se refiere a todas las posibles estructuras matemáticas que puedan existir, lo que se representa en la figura 2. Según Tegmark, hoy en día disponemos de gran cantidad de pruebas de que nuestro universo es una estructura matemática. Esto va un poco más allá de lo que los físicos argumentarían normalmente: se suele decir que nuestro universo es descrito por leyes matemáticas, lo que no es lo mismo que equipararlo a una estructura matemática en sí. La proposición de Tegmark es, entonces, que las estructuras matemáticas no describen una realidad, sino que son la realidad misma. El universo es las ecuaciones que lo describen. Por supuesto, no las que podemos ver en un papel, sino la relación abstracta entre entidades que representan.

Si es matemáticamente posible, existe

Puede parecer difícil que todas nuestras sensaciones puedan estar contenidas en algo que se podría escribir en una servilleta. Sin embargo, Tegmark argumenta que nosotros vemos una estructura desde dentro: es decir, vemos todo aquello a lo que la teoría da lugar. La idea

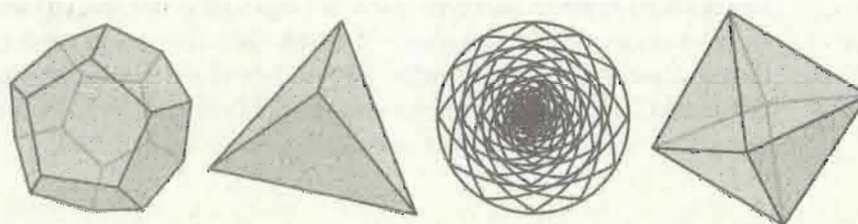
de Tegmark sirve para responder a la cuestión: ¿por qué estas leyes de la física y no otras? La respuesta es que toda ecuación da lugar a un universo, de forma que todo lo matemáticamente posible existe. Por supuesto, el cuarto nivel del multiverso pertenece al ámbito de la especulación, pero resulta una posibilidad intrigante y, cuando menos, un estimulante ejercicio intelectual.

FIG. 1



Universos-burbuja producidos por la inflación. Cada universo tiene leyes distintas de la física; los universos están aislados causalmente.

FIG. 2



El universo matemático de Tegmark. Cada estructura matemática corresponde a un universo distinto.

pos hay en el universo? Resulta ser una simetría abstracta de las ecuaciones, que no tiene equivalente alguno en el mundo real. Es decir: el nivel último de la realidad al que, de momento, tenemos acceso, muestra una estructura matemática completamente alejada del concepto de solidez al que estamos acostumbrados.

En este contexto, la propuesta de Wheeler de *It from bit* cobra un nuevo sentido: ¿y si todo lo que hay es un proceso de información? ¿Y si el universo es, en esencia, un proceso matemático abstracto? En este caso, quizá la idea de los universos falsos no sea tan desastrosa. Un universo falso es indistinguible de uno verdadero: de hecho, la distinción no tiene sentido. Ambos son procesos de información y nada más.

Esta idea nos lleva al último nivel de multiverso que sugiere el cosmólogo Max Tegmark: todos los universos matemáticamente posibles son reales. Este tipo de multiverso, completamente especulativo, tiene una gran ventaja sobre el físico: requiere mucha menos explicación. En el caso del multiverso inflacionario, uno siempre podría preguntarse un porqué más: ¿por qué tiene el universo leyes que dan lugar a un multiverso? Si uno acepta que todos los universos matemáticos son posibles, la pregunta se responde a sí misma. Además, el multiverso de Tegmark acaba con la objeción de los universos falsos: tanto los universos reales como los falsos son universos matemáticos y, por lo tanto, son igualmente reales. Todos forman parte del inmenso multiverso de todo lo matemáticamente posible.

Por supuesto, la teoría de Tegmark es pura especulación: no hay nada en nuestro universo que nos haga sospechar que es cierta. No solo eso: dado que lo predice todo, sin excepción, no hay forma posible de comprobarla. El multiverso de Tegmark está destinado a permanecer para siempre en el reino de la filosofía, lo cual no es necesariamente malo, pero nunca será ciencia.

PRINCIPIO ANTRÓPICO, CIENCIA Y FILOSOFÍA

La discusión anterior muestra que la idea del multiverso, aunque científica en un principio, nos fuerza a considerar una serie de

cuestiones que están muy alejadas de la ciencia. La aplicación del principio antrópico a todo ello nos lleva a conclusiones aparentemente absurdas, como que vivimos en un universo simulado. Todo esto son cuestiones abiertas que, por el momento, no parecen llevar visos de solucionarse en un futuro inmediato. Es fácil ver por qué este tipo de cuestiones pone nerviosos a los científicos: les fuerzan a ir a terrenos anteriormente reservados a la religión, con una caja de herramientas que resulta completamente inadecuada para la tarea a la que se ven abocados.

Por desgracia, hoy en día parece casi inevitable que el principio antrópico tenga un papel en explicar por qué vivimos en el universo en que lo hacemos. Esto significa que, tarde o temprano, la física va a tener que ocuparse de estas cuestiones o, hartado improbable, admitir la derrota.

Consecuencias del razonamiento antrópico

Aplicar el razonamiento antrópico al porvenir de nuestra civilización conlleva una serie de predicciones inquietantes, como la que se deriva de una aplicación rigurosa del principio de automuestreo. Según este, la especie humana está a punto de extinguirse.

¿Cuánto tiempo le queda a nuestra civilización? Esta es una pregunta que ocupa a innumerables científicos, políticos y filósofos, que se esmeran por evitar una catástrofe que dé al traste con la especie humana. Hay muchos candidatos a ser la causa del juicio final: desde el impacto de un meteorito hasta el cambio climático, pasando por superbacterias y holocaustos nucleares.

El principio antrópico ofrece una forma de estimar el tiempo que nos queda en este planeta. Suponiendo que somos un observador elegido al azar y aplicando un razonamiento probabilístico, podemos deducir la vida media de nuestra civilización.

EL ARGUMENTO DEL JUICIO FINAL

Ha habido varios intentos de usar el principio antrópico para calcular la fecha del juicio final. El primer cálculo de estas características fue realizado por John Richard Gott III (n. 1947), catedrático de astrofísica en la universidad de Princeton, mientras visitaba el muro de Berlín en 1969, cuando la estructura tenía ocho años. A Gott se le ocurrió que podía estimar cuándo sería

derruido, siempre que supusiera que el momento en el que lo estaba viendo era un instante típico en la vida del muro.

Para entender lo que hizo Gott ayudará pensar primero en una regla. Supongamos que la regla tiene una longitud de 10 cm y que escogemos un punto al azar (figura 1). Nos preguntamos cuál es la probabilidad de que caigamos, por ejemplo, entre las marcas de 4 y 6 cm. Dado que cada punto tiene la misma probabilidad de ser escogido, tenemos un 20% de probabilidad; por el contrario, la probabilidad de escoger un punto entre 2 y 8 cm es del 60%.

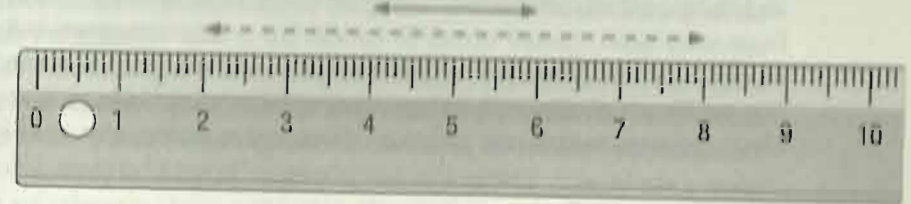
Imaginemos ahora que tenemos dos reglas, una de 10 cm y otra de 1 km. Una persona escoge una longitud al azar en una de ellas y esta resulta ser de 7 cm. ¿Qué regla ha utilizado? La respuesta más obvia es que tiene que haber escogido la de 10 cm. Si ignoramos detalles menores que 1 cm, la probabilidad que tenemos de obtener 7 cm en la regla pequeña es de 1 entre 10, mientras que en el caso de la mayor es de 1 entre 100 000. Por lo tanto, haber escogido la regla de 10 cm es 10 000 veces más probable que la de 1 km.

Dado el razonamiento anterior, podemos hacer la siguiente deducción: si nos dan una longitud escogida al azar entre reglas de distintas longitudes, cabe esperar que la longitud de la regla sea aproximadamente el doble que la longitud que hemos encontrado. Por supuesto, eso no funcionará siempre: se trata de un cálculo probabilístico. Pero, si tuviéramos que hacer una apuesta, sería racional hacerla basándonos en esta hipótesis.

Podemos ir incluso más allá y estimar la probabilidad de que la longitud sea un número determinado. Supongamos que realizamos una medida en una regla aleatoria. ¿Cuál es la probabilidad de que esa medida se encuentre entre una longitud del 25% y el 75% de la longitud total? Una rápida inspección de la figura 1 muestra que tiene que ser del 50%.

Pongamos ahora que el resultado de nuestra medida es de 5 cm. Como hemos visto, hay un 50% de probabilidades de que esta longitud se encuentre entre el 25% y 75% de la longitud total. Podemos usar ese dato para obtener un límite superior e inferior a la longitud de nuestra regla. Si, por ejemplo, decidimos que esos 5 cm representan el 25% de la longitud total, nuestra

FIG. 1



Dos intervalos en una regla de diez centímetros. Hay una probabilidad del 20% de que escojamos un punto en el intervalo dado por la flecha sólida y un 60% de hacerlo en el de la línea de puntos.

FIG. 2



Si obtenemos un resultado de 5 cm, podemos deducir que el tamaño de nuestra regla está entre los dos extremos de la flecha, con una probabilidad del 50%.

regla tiene que ser cuatro veces mayor, de forma que su longitud será de:

$$4 \times 5 \text{ cm} = 20 \text{ cm}.$$

Si, por el contrario, suponemos que esos 5 cm representan el 75% de la longitud total, obtenemos una longitud de la regla de 6,67 cm. De esta forma, podemos afirmar que la longitud de nuestra regla tiene que estar entre 6,67 y 20 cm, con un 50% de probabilidad, como se observa en la figura 2.

Podemos, por supuesto, estimar la longitud de la regla aún con más precisión. Basta con considerar un intervalo mayor: por ejemplo, hay un 95% de probabilidades de que la longitud que hemos medido esté entre el 2,5% de la longitud original y el 97,5%. Usando un razonamiento análogo al anterior, podemos deducir que la longitud de la regla está entre 5,12 cm y 2 m, con un 95% de probabilidad.

Lo que acabamos de deducir tiene que funcionar también para intervalos temporales. Supongamos que un objeto tiene una

«longitud temporal» de cientos de años y que lo visitamos en un momento de su historia escogido aleatoriamente. Es racional suponer que nuestra visita se producirá a una «distancia» del inicio aproximadamente igual a la mitad de la duración total. Por ejemplo, si un monumento dura cien años, la gran mayoría de los visitantes lo verá en un intervalo de tiempo entre diez y noventa años y serán muy pocos los que lo hagan durante el primer milisegundo, comparativamente. Si una visita aleatoria se da en el primer milisegundo, es racional suponer que el monumento no durará mucho.

Antes de pararnos a hablar del argumento de Gott para el muro de Berlín, debemos enfatizar que esto solo se aplica cuando la visita no es especial. Por ejemplo, si fuéramos parte del equipo que construyó la Gran Esfinge de Guiza, no podríamos aplicar el razonamiento antrópico para estimar su longevidad: estamos en una posición privilegiada y lo sabemos. Por el contrario, si somos uno de los muchos turistas que han visitado la esfinge, tiene más sentido considerarnos como un observador elegido aleatoriamente.

Gott usó este razonamiento para estimar cuándo sería derribado el muro de Berlín. Su deducción fue muy similar a la que hemos utilizado antes para estimar la longitud de nuestra regla. Supongamos que Gott visitó Berlín en un momento aleatorio. Eso significa que hay un 50% de posibilidades de que su visita al muro sucediese entre un 25% y un 75% del transcurso de su vida total. Por lo tanto, el muro de Berlín tendría que durar un máximo de ocho por cuatro, es decir treinta y dos años desde su construcción o veinticuatro desde la visita de Gott. Dado que visitó Berlín en 1969, Gott estimó que el muro ya no existiría en 1993, con un 50% de probabilidad, siendo cada vez más probable su caída a partir de ese año. Como sabemos hoy, la deducción de Gott resultó acertada, dado que el muro cayó en 1989.

Este tipo de razonamiento basado en el principio antrópico puede aplicarse a todo tipo de monumentos. Por ejemplo, podemos estimar que las pirámides durarán unos ocho mil años más. Sin embargo, en este caso tenemos que tener otros factores en cuenta: la deducción está basada en la presencia de observa-

dores aleatorios. Si, por ejemplo, la humanidad se extinguiese antes de ese tiempo, ya no habría observadores en las pirámides. Así pues, esos ocho mil años señalan o bien el momento en el que las pirámides dejan de existir o bien el momento en el que ya no hay más observadores para verlas. Eso puede significar que la especie humana no existe o, quizá, que hemos perdido todo interés en visitar reliquias de otras épocas.

Podemos ahora ver cómo el argumento de Gott se aplica a la supervivencia de nuestra especie. En su forma más ingenua, reza así: consideremos el intervalo de tiempo en el que existe la raza humana. Suponiendo ahora que somos una persona escogida al azar, hay un 50% de posibilidades de que el tiempo transcurrido hasta hoy sea entre el 25% y el 75% de la duración total de la humanidad. Por consiguiente, podemos usar lo que sabemos sobre la aparición del género humano para estimar cuánto durará nuestra civilización. Si tenemos en cuenta que la especie humana, contando solo el *Homo sapiens*, apareció en la Tierra hace unos 200 000 años, podemos concluir que nos quedan entre 267 000 y unos 600 000 años de historia.

El «reloj de nacimientos»

La versión ingenua de Gott no acaba de funcionar, porque da por sentado que la variable importante es el tiempo y no los observadores. Pero eso no tiene sentido. Imaginemos el siguiente ejemplo: una cañería gotea al ritmo de una gota por minuto durante dos días. Finalmente, la presión del agua aumenta hasta tal punto que la cañería revienta, evacuando litros y litros de agua en el espacio de cinco minutos. Supongamos que escogemos una molécula de agua al azar entre todas las que han salido de la cañería. ¿En cuál de las dos épocas tenemos más probabilidad de haber escogido la molécula? Por supuesto, en la segunda: en este caso, la variable importante no es el tiempo, sino la cantidad de moléculas de agua que salen cada minuto. Dado que hay muchísimas más moléculas hacia el final, tenemos que suponer que una molécula al azar habrá salido entonces.

Algo parecido se da con los seres humanos. Si bien es cierto que llevamos cientos de miles de años en el planeta, solo hacia el final ha habido una cantidad importante de personas. La población humana durante la prehistoria era irrisoria comparada con la actual (figura 3): de hecho, se estima que alrededor de un 6% de todas las personas que han vivido hasta la fecha lo hace hoy. Si la población continúa creciendo, esta tendencia no hará más que aumentar.

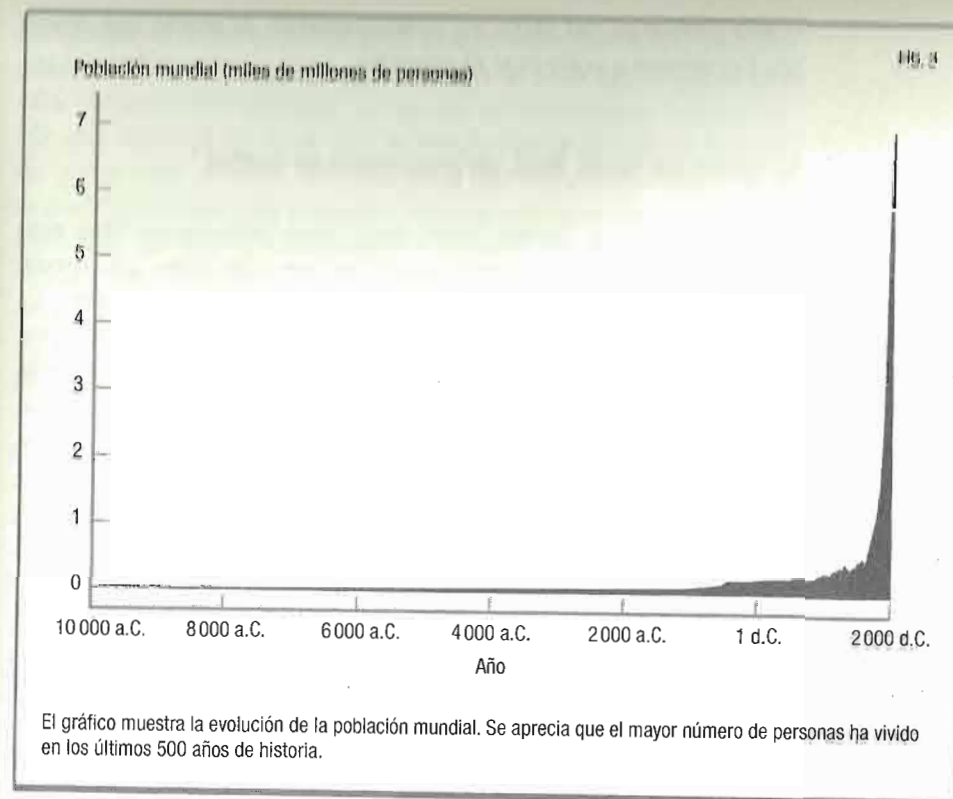
Así pues, si queremos usar el principio antrópico para calcular cuántos años nos quedan de civilización, tenemos que usar una especie de «reloj de nacimientos»: es decir, tenemos que medir el tiempo en nacimientos de humanos y no en años. Solo así lograremos obtener una estimación más razonable del momento en el que desaparecerá la humanidad.

Para realizarla, procedemos de la siguiente manera: primero, calculamos todos los nacimientos que ha habido hasta la fecha. Por supuesto, es muy difícil obtener una cifra exacta, pero varias estimaciones la sitúan en torno a 10^{11} o 100 000 millones. Usando el argumento anterior, podemos deducir que, con un 50% de probabilidad, nacerán 200 000 millones más de personas antes del fin de la humanidad.

Ahora nos vemos con un problema: nuestro resultado depende de una serie de suposiciones. Por ejemplo, podemos suponer que las personas seguirán naciendo a un ritmo parecido al actual, que es de 10^8 o de unos cien millones de nacimientos por año. Un cálculo simple nos da una estimación de los años que le quedan a la humanidad a este ritmo:

$$\frac{10^{11}}{10^8} = 1000.$$

Es decir, la humanidad tendría que extinguirse en aproximadamente mil años. Sin embargo, puede que, por alguna razón, el ritmo de nacimientos baje drásticamente, en cuyo caso podríamos sobrevivir durante un tiempo indeterminado. También podría suceder que la población siguiese aumentando como lo ha



hecho hasta la fecha. En este caso, mil años sería una estimación optimista.

A pesar de que el resultado anterior deja lugar a cierto margen, hay algunas conclusiones que se pueden derivar del mismo que dejan poco lugar a dudas. Por ejemplo, el argumento del juicio final prácticamente garantiza que la humanidad nunca colonizará otros planetas. La razón es obvia: si lo hiciéramos, en algún punto de nuestra historia habría muchos más humanos vivos de los que ha habido hasta ahora. Es decir: si la humanidad llega a colonizar el espacio, un humano escogido aleatoriamente se encontraría en otro planeta. Además, dado que habría muchos más humanos en el futuro que en el presente, ser una persona del siglo XXI resultaría bastante atípico. Así pues, nuestra existencia

como personas del siglo xxi prácticamente descarta que algún día lleguemos a colonizar el espacio.

La teoría del juicio final, un argumento en contra

Como toda teoría, la del juicio final tiene detractores. Hay muchos argumentos en contra, algunos con más base que otros. Nick Boström enumera algunos en su libro *Sesgo antrópico*.

Una objeción típica es que el argumento del juicio final no funciona siempre. Por ejemplo, un hombre de Cromañón podría haberlo aplicado y habría llegado a conclusiones erróneas, dado que la humanidad ha sobrevivido mucho más de lo que habría cabido esperar según sus cálculos. Sin embargo, usar este argumento equivale a no entender cómo funcionan las leyes de la probabilidad. Por supuesto que el argumento del juicio final no funciona para todos los observadores: se trata de un argumento probabilístico. Algunos observadores nacerán hacia el final de la raza humana y otros lo harán al principio: para estos, aplicar el razonamiento anterior les llevará a hacer predicciones erróneas. Sin embargo, eso es lo que afirma el argumento del juicio final: hay una probabilidad de un tanto por ciento dado, que podemos calcular, de que la humanidad se extinga antes de cierta fecha. Eso no significa que tenga que hacerlo: solo significa que, si todos los miembros de la humanidad a lo largo de la historia apostasen a la fecha en que las personas desaparecen basándose en el argumento del juicio final, la mayoría saldría ganando.

Otra objeción que suele anteponerse es decir que uno no podría haber sido un humano de la época medieval porque no lo es. No tiene sentido preguntarse en qué época podríamos haber nacido: hemos nacido en nuestra época y cualquier persona que lo haya hecho en otro instante no es uno mismo. Sin embargo, esto implica otra confusión con el argumento del juicio final: este no hace afirmación alguna sobre la consciencia y sobre dónde pudiera residir. Dicho de otra forma, no estamos hablando de almas que se ubican en un cuerpo u otro aleatoriamente. El argumento del juicio final dice solo que tenemos que razonar como si

fuéramos un observador elegido al azar entre todos los posibles, pero no hace aseveración alguna sobre si podríamos haber sido otra persona. Por ejemplo, en un día de invierno es más probable que estemos en casa, por la simple razón de que la mayoría de gente está en casa. No hace falta que afirmemos nada sobre si podríamos ser otra persona: seamos quienes seamos, es muy probable que nos encontremos en nuestra casa.

Hay una crítica con algo más de peso a la que Boström bautiza como la «paradoja del bebé» y que fue acuñada por el matemático francés Jean-Paul Delahaye (n. 1952). Delahaye señala que el argumento del juicio final se puede aplicar también a la vida misma de la persona. Por ejemplo, si uno tiene cuarenta años y asume que se encuentra en un momento aleatorio de su vida, puede concluir que morirá entre los cincuenta y los ciento veinte años, con un 50% de probabilidad. El problema con este razonamiento es que también podría aplicárselo un bebé, llegando a la conclusión de que vivirá apenas unos días. Hay otra forma equivalente de expresar el problema y es centrándose en un aspecto trivial de nuestras vidas. Por ejemplo, uno puede acabar de leer sobre el argumento del juicio final por primera vez. Si ahora asumimos que nos encontramos en un momento aleatorio de nuestra vida como personas que conocen el argumento del juicio final, podemos llegar a la conclusión de que nos quedan segundos de vida.

El argumento de Delahaye falla por dos lados. El caso del bebé es parecido al del hombre de Cromañón: nadie discute que el argumento no funciona para un cierto número de personas y, en este caso, para ciertas etapas de nuestra vida. De nuevo, si una persona aplicase el argumento del juicio final a cada segundo de su vida, resultaría estar en lo cierto la mayoría del tiempo, pero por supuesto no lo estaría en algunos casos.

El segundo problema con el argumento es que no elige bien su «clase de referencia», que es el conjunto de objetos entre los que escogemos uno aleatoriamente. Por ejemplo, en una cierta lotería la clase de referencia serán todos los números del uno al 999 999 y en las tiradas de un dado, los números del uno al seis. En el caso del argumento del juicio final, la clase de referencia son todas las personas que han nacido a lo largo de la historia de la humanidad.

El quid de la cuestión es que uno debe actuar como si fuese un observador escogido al azar en su clase de referencia, siempre y cuando no tenga mejor información que esa. En el caso de la persona que acaba de leer el argumento del juicio final, tiene sin duda más elementos en los que basar su predicción que el mero hecho de que se encuentra en un momento aleatorio de su vida. Por ejemplo, sabe o puede deducir que la mayor parte de las personas que lean acerca del argumento del juicio final serán al menos adolescentes. Sabe también que, entre todas las personas que han leído acerca del argumento del juicio final, muy pocas han muerto a los pocos segundos. En otras palabras, su clase de referencia no son solo los distintos instantes de su vida, sino los distintos instantes de la vida de muchas otras personas. En este caso, el razonamiento antrópico da resultados perfectamente razonables.

¿Cuál es mi clase de referencia?

La paradoja del bebé, aunque equivocada, apunta a un problema fundamental en el argumento del juicio final: el hecho de que la elección de nuestra clase de referencia es arbitraria. Hasta ahora hemos dado por sentado que nuestra clase de referencia es el conjunto de los seres humanos que han nacido a lo largo de la historia de la humanidad. ¿Podría ser distinta? Por supuesto.

Por ejemplo, podríamos contar todos los homínidos, no solo los humanos. Al fin y al cabo, pocos científicos negarán que se trata de seres con consciencia propia, así que ¿por qué no considerarlos en la definición de «observador»? Pero eso nos lleva a considerar a otras especies. ¿Y los chimpancés, bonobos y gorilas? Todos ellos se reconocen en un espejo, lo que revela que tienen consciencia de sí mismos. También la poseen los delfines y los cuervos, y ambos son considerados más inteligentes que los chimpancés.

Otra cuestión es si deberíamos contar a todos los mamíferos. Quizá no todos se reconozcan en un espejo, pero no hay duda de que son capaces de sufrir y de que tienen impresiones sensibles, es decir, ven imágenes, huelen y sienten. ¿Por qué no incorpo-

EL FIN DE LA VIDA EN LA TIERRA

De la misma forma que hemos aplicado el argumento del juicio final a la desaparición de la especie humana, podemos hacer algo similar con la desaparición de la vida en la Tierra. En este caso, dado que es muy difícil usar algo parecido al reloj de nacimientos, tendremos que basarnos puramente en argumentos temporales.

¿Cuánto falta para la extinción?

La mayoría de estimaciones sitúan la aparición de la vida en la Tierra hace unos 3500 millones de años. Podemos ahora usar un argumento parecido al de Gott para deducir cuánto tiempo le queda. Como se ha visto, para ello debemos considerar que la fecha actual se encuentra entre el 25% y el 75% del total. Así pues, obtenemos un mínimo de 4700 millones de años y un máximo de 14000 millones. En este caso, nuestras estimaciones parecen divorciadas de lo que sabemos: en particular, como muestra la figura, que el Sol se convertirá en una gigante roja de aquí a unos 5000 millones de años, acabando con la vida en nuestro planeta. Sin embargo, esto no invalida el argumento: se trata de una estimación burda, basada solo en el hecho de que conocemos nuestra posición temporal. Si disponemos de información extra, como es el caso, podemos usarla para afinar nuestros cálculos. Se puede hacer un cálculo parecido para la longevidad de la vida pluricelular. Dado que esta apareció en el Cámbrico, hace unos 500 millones de años, podemos deducir que le quedan entre 150 y 1500 millones de años antes de desaparecer.

Los dos cálculos anteriores dan una idea de los límites del razonamiento antrópico. Por un lado, para obtener probabilidades significativamente altas necesitamos considerar intervalos enormes de tiempo, con lo cual su poder predictivo queda negativamente afectado. Por otro, en muchos casos acabamos por llegar a conclusiones que podríamos haber obtenido de forma mucho más sencilla con otros métodos. Todo esto nos enseña que los razonamientos antrópicos tienen que ser tomados en serio, pero no pueden sustituir al resto.



Ciclo de vida del Sol. Usando un razonamiento antrópico, podemos esperar que la vida desaparezca en algún momento dentro del intervalo mostrado por la flecha doble.

rarlos también a nuestra clase de referencia? Quizá los reptiles también entren; desde luego, la mayoría de pájaros lo harán. Si tenemos en cuenta todo ello, podemos estimar que a nuestra civilización le quedan unos mil millones de años, algo que coincide con el momento en el que el Sol empezará a brillar tanto que la vida en la Tierra se volverá imposible.

Por supuesto, en este caso resulta difícil saber qué estamos prediciendo. Ya no estamos hablando de humanos, sino de seres que sienten. Pero ¿quién nos asegura que seguiremos siendo humanos en un millón de años? Quizá la especie humana haya cambiado tanto para entonces que ya no tenga sentido considerar a esas criaturas como parte de nuestra clase de referencia. En este sentido, el argumento del juicio final nos podría mostrar simplemente que a la humanidad como tal le queda poco tiempo, porque será sustituida por criaturas que Nick Boström llama «post-humanas»: el resultado de aplicar las nuevas tecnologías a la evolución de nuestra especie. Por ejemplo, podríamos usar la ingeniería genética para volvernos más inteligentes o, simplemente, hacer una copia de nosotros mismos en un ordenador, volviéndonos personas virtuales. Si este es el caso, no está nada claro que esos nuevos seres formen parte de nuestra clase de referencia.

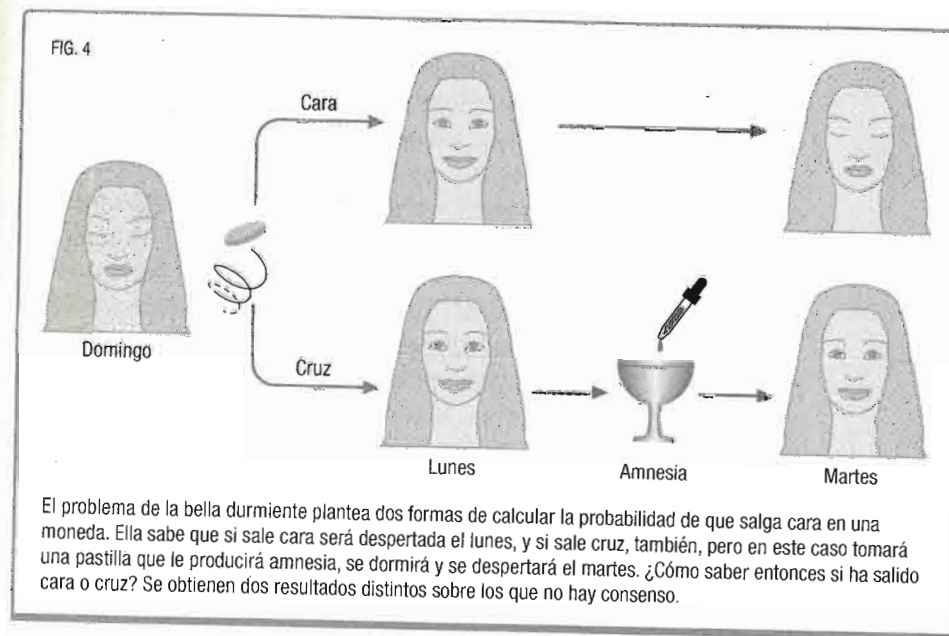
Como puede verse, el argumento del juicio final, aunque evocador, tiene múltiples resquicios que obligan a no tomárselo demasiado en serio. Sin embargo, es una forma de razonar útil para preparar estrategias con el fin de evitar una extinción prematura de la humanidad. Si es cierto que estamos subestimando sistemáticamente nuestra probabilidad de extinción, tendríamos que tomar medidas drásticas para tratar de asegurarnos de que no ocurra. Quizá el mero hecho de ser conscientes del argumento del juicio final hará que deje de ser válido.

EL PROBLEMA DE LA BELLA DURMIENTE

El razonamiento antrópico no solo tiene cabida en la física, sino que se ha hecho un hueco también en las matemáticas puras. Un ejemplo perfecto de ello es el llamado «problema de la bella dur-

miente», formulado por primera vez en 1990 por el matemático británico Arnold Zuboff. Reza como sigue: la bella durmiente se ofrece voluntaria para ser objeto de un experimento. El domingo será sedada; más adelante se la despertará una o dos veces, dependiendo del resultado de lanzar una moneda. Si sale cara, se despertará el lunes y será entrevistada. Si sale cruz, se despertará el lunes y será entrevistada, pero luego será sedada de nuevo, perdiendo todo recuerdo de haber estado despierta. El martes la despertarán otra vez. Además, la bella durmiente solo sabrá que la despiertan, pero nadie le dirá qué día es (figura 4).

Los científicos preguntan a la bella durmiente sobre la probabilidad que asigna a que el experimentador obtenga cara al lanzar la moneda. Por supuesto, la bella durmiente responde que un 50% o 0,5, dado que las probabilidades se suelen expresar en tantos por uno. Después de ser sedada y tras despertar, los científicos vuelven a preguntar a la bella durmiente qué probabilidad asigna a que hayan obtenido cara, pero en este caso la bella durmiente no sabe qué responder: ¿es de nuevo de 0,5? Al fin y



al cabo, solo hay dos opciones: cara o cruz. ¿O quizá es de un tercio? Hay dos posibilidades de despertarse en el caso de cruz, mientras que solo una para el resultado de cara. Así que un tercio parece más razonable.

Si nuestro universo local y observable está incrustado en una estructura mayor, un multiverso, existen entonces otros lugares en esa estructura cuyos habitantes llaman a su vez a su entorno local el universo.

SEAN CARROLL

Este sencillo problema ha tenido a matemáticos y físicos en vilo durante años y, de hecho, aún no existe una solución de consenso. El problema es complicado porque obliga a plantearse qué queremos decir exactamente cuando hablamos de probabilidades. Parte de su dificultad se basa en que, como el resto de ejemplos de este capítulo, es un problema antrópico. El físico estadounidense Sean Carroll

(n. 1966) lo describe como un problema de incertidumbre en la propia posición: es decir, «el tipo de problema donde uno lo sabe todo sobre el universo excepto su lugar en él».

El problema de la bella durmiente está relacionado con cuestiones candentes de la cosmología. Por ejemplo, pongamos que tenemos dos teorías en competición entre las cuales, con los datos experimentales en la mano, no podemos decidir. Supongamos que una de las teorías predice que en el universo tiene que haber alrededor de un trillón de trillones de observadores, mientras que la otra predice solo un trillón. ¿Tendríamos que rechazar la segunda teoría? Un partidario del resultado de un tercio nos diría que sí: dado que somos un observador aleatorio y hay un trillón de veces más observadores en la primera teoría, tenemos que asignar una probabilidad a esta un trillón de veces mayor que a la segunda. Sin embargo, esto no parece tener ningún sentido: si solo hay un universo, cualquier teoría que prediga al menos un observador será tan probable como la otra. En este caso, ambas teorías tendrían que ser igualmente probables. Volviendo al caso de la bella durmiente, la probabilidad de haber obtenido cara tendría que ser un medio.

Este ejemplo puede parecer artificial, pero es de hecho muy parecido a lo que sucede hoy mismo en cosmología. Como se

ha visto anteriormente, el universo puede tener distintas geometrías: abierta, cerrada o plana. Un universo plano contiene una cantidad infinita de espacio y, por lo tanto, de observadores, mientras que un universo cerrado no. ¿Podemos concluir entonces que el universo plano es infinitamente más probable que el cerrado? ¿Deberíamos dejar de hacer experimentos al respecto, dado que el principio antrópico nos da la respuesta? Obviamente no.

Parece que los defensores de la probabilidad de un medio —a los que se suele llamar «medios»— llevan las de ganar, pero hay argumentos poderosos a favor de la interpretación de un tercio. Nick Boström propone la siguiente modificación del experimento de la bella durmiente, al que ha bautizado la «bella durmiente extrema»: se trata de una situación idéntica a la anterior, pero en este caso la bella durmiente será despertada y vuelta a sedar un millón de veces. Si se despierta el lunes ¿qué probabilidad debería asignar a que el experimentador haya obtenido cara?

De nuevo, aquí los partidarios de la respuesta de un tercio —llamados «tercios»— dirán que esa probabilidad tiene que ser de una entre un millón y uno, ya que existen un millón y una posibilidades, solo una de las cuales corresponde a haber obtenido cara. Sin embargo, esto parece absurdo: si sabemos que la moneda no está trucada, tendríamos que concluir que la probabilidad es del 50%.

Pero ¿qué pasaría si realizásemos ese experimento millones de veces? Supongamos que somos la bella durmiente y tenemos que apostar sobre el resultado del lanzamiento de la moneda. ¿Cuál es la apuesta más racional? Dado que, de todas las veces que despertamos, en la gran mayoría los científicos han obtenido cruz, tenemos que concluir que hay una probabilidad mucho mayor de cruz que de cara.

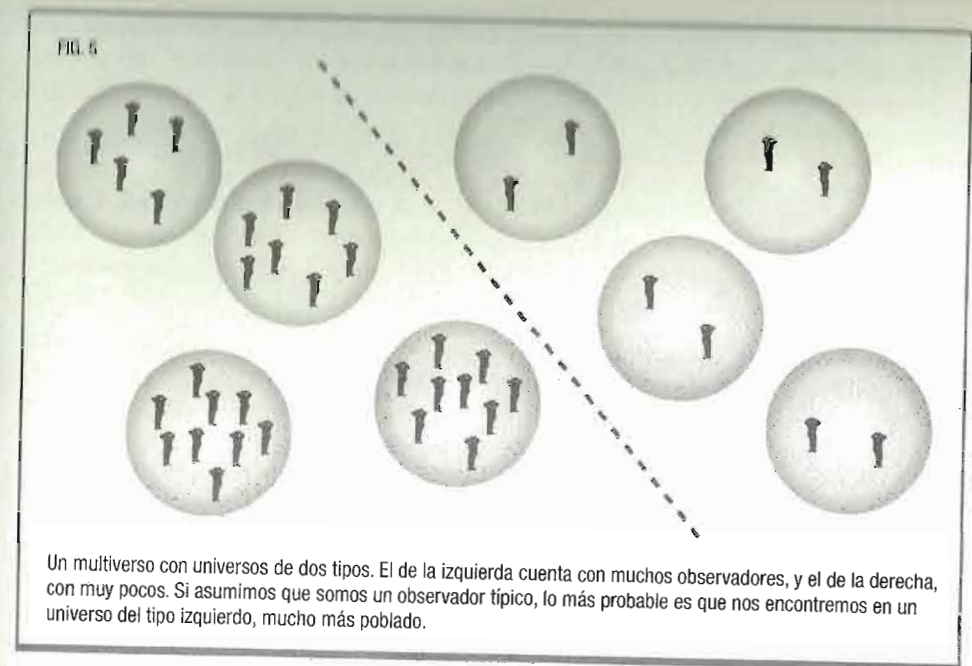
Podemos ahora aplicar este razonamiento a las dos teorías con diferentes números de observadores. Si un observador cualquiera en el universo tuviera que hacer una apuesta sobre en qué universo se halla, ¿qué sería lo racional? Dado que en la primera teoría hay muchos más observadores, parece lógico apostar por ella. Sin embargo, no lo es, porque hay una diferencia clave con

el experimento anterior: en este caso, solo hay un universo, así que cabría esperar que la probabilidad fuera del 50%. En el caso de la bella durmiente en el que hemos repetido el experimento millones de veces, tenemos una multitud de repeticiones que nos permiten hacer ese cálculo de probabilidades.

El problema ganará claridad si consideramos las dos teorías anteriores en el ámbito del multiverso. Supongamos que nuestras teorías no son ahora excluyentes, sino que describen distintos universos dentro del multiverso. Pongamos, por ejemplo, que el 50% de los universos vienen descritos por la primera teoría, que predice trillones de observadores, y el otro cincuenta por la otra, que solo predice billones. En este caso, sería racional concluir que nos encontramos en uno de los universos con más observadores (figura 5).

Los ejemplos anteriores revelan que hay una diferencia clave entre realizar el experimento una vez y realizarlo cientos de veces. Señalan, además, que la probabilidad que obtengamos depende de nuestra clase de referencia. En el caso donde solo hay un universo pero hay dos teorías en competición, nuestra clase de selección son los universos, no los observadores: tenemos dos universos posibles, ambos con igual probabilidad. Así pues, lo racional es no optar por ninguno y dejar que los experimentos hagan su trabajo. Por otro lado, si sabemos con certeza que existe una gran cantidad de universos, parece lógico asumir que nos encontraremos en aquellos donde tienda a haber más observadores, simplemente porque es más probable. En este caso, nuestra clase de selección son los observadores: entre todos los observadores del universo, ¿cuál de ellos somos? Con toda probabilidad, uno de los más típicos.

El experimento mental de la bella durmiente también revela la confusión que existe sobre el significado de la probabilidad. ¿Se refiere la probabilidad a frecuencias relativas? ¿O es quizá una función de las creencias que debería tener un individuo racional? ¿Está relacionada con el resultado de apuestas sobre eventos aleatorios? La discusión sobre el problema revela las múltiples asunciones que realizan diferentes científicos y matemáticos y les obliga a articular sus creencias de forma más explícita. Es



así como se logra avanzar en la comprensión de cálculos de probabilidad tan complejos como los que involucran al multiverso, donde no solo tenemos un número enorme de posibilidades difíciles de contar, sino que nuestro papel como observadores hace que cometamos errores sistemáticos al estimar las probabilidades de diferentes eventos.

En la actualidad sigue sin haber consenso sobre el problema de la bella durmiente. Hay grupos enteros de físicos, matemáticos y filósofos que están absolutamente convencidos de que su respuesta es la correcta; a su vez, hay otros grupos igual de numerosos e igual de convencidos que creen que estos se equivocan. Nick Boström sugiere que ninguno de ellos tiene razón, porque el problema está formulado de forma ambigua. Curiosamente, casi todo el mundo está de acuerdo en que la bella durmiente tendría que apostar por cruz, pero al mismo tiempo muchos niegan que la probabilidad esté relacionada con el porcentaje de veces que la joven ganará su apuesta.

PROBABILIDAD BAYESIANA CONTRA FRECUENTISTA

En matemáticas existen dos interpretaciones muy distintas del significado de la probabilidad. Quizá la más conocida, por ser enseñada en las escuelas, es la frecuentista, la cual afirma que la probabilidad de un suceso nos da información sobre su frecuencia relativa, siempre que ese suceso sea repetible. Para ser más exactos, si repetimos el experimento un número infinito de veces la probabilidad es igual a la frecuencia relativa. Para entender esta idea, basta fijarse, como ilustra la imagen de la figura 1, en el lanzamiento de una moneda. Si la moneda no está trucada, tenemos un 50% de posibilidades de obtener cara, es decir, una probabilidad del 0,5. Por supuesto, eso no significa que, si lanzamos la moneda diez veces, tengamos que obtener cinco caras; de hecho, es muy probable que obtengamos tres, cuatro o seis caras, por ejemplo. No obstante, si lanzamos la moneda un número enorme de veces, veremos que la proporción de sucesos en los que obtenemos cara se aproxima al 50%.

¿Cuál es la pregunta adecuada?

La escuela bayesiana interpreta la probabilidad de forma muy distinta. Para esta, la probabilidad de un suceso se basa en nuestro grado de información sobre el mismo. Por ejemplo, uno puede fijarse en un coche en la autopista, como muestra la figura 2, y preguntarse: ¿cuál es la probabilidad de que su velocidad real sea de cincuenta kilómetros por hora? Antes de hacer la medida, y dado que no tenemos información alguna al respecto, es legítimo hacernos esta pregunta. En cambio, un frecuentista nos diría que eso no tiene sentido: la velocidad real del coche no es un suceso repetible. Nos podemos preguntar cuál es la probabilidad de que una medida nos dé un cierto resultado, pero no por la probabilidad de un suceso único, porque, al no poder repetirlo, no podemos asociarle una frecuencia. De forma similar, en el caso bayesiano es frecuente encontrarse con afirmaciones como: «dados los datos, la probabilidad de que la carga del electrón tenga este valor es del 75%», algo que nunca diría un frecuentista. En términos filosóficos, podría decirse que la probabilidad bayesiana es «subjetivista», en el sentido que trata del grado de creencia subjetiva en una cierta afirmación, mientras que la frecuentista no entra a discutir los grados de credibilidad de sus resultados.

¿Considerar probabilidades previas afecta el resultado?

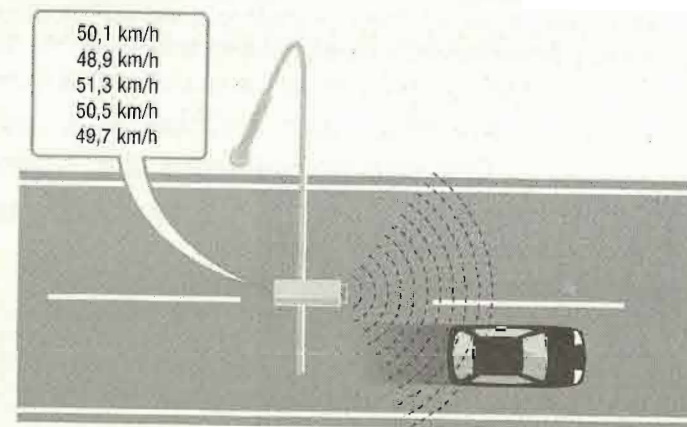
Otra diferencia fundamental es la consideración de una «probabilidad *a priori*», algo que hace la escuela bayesiana pero no la frecuentista. La distribución de probabilidad *a priori* se usa para modelar las creencias del observador, antes de realizar medida alguna. Es decir: nos dice lo que cabría esperar, basado en la información de que disponemos sobre el sistema antes de medirlo. Esto es criticado por los frecuentistas, que lo consideran como la introducción de datos subjetivos en lo que tendría que ser una empresa sin sesgos. Hoy en día, sin embargo, parece que la escuela bayesiana convence cada vez a más matemáticos. A pesar del gran éxito de la escuela frecuentista, algunos matemáticos objetan que se basa en una premisa imposible. No se pueden realizar infinitas repeticiones de un experimento y, por lo tanto, el significado real de la probabilidad no queda lo suficientemente claro.

Fig. 1



Una moneda lanzada 26 veces. En este caso, hay 10 caras y 16 cruces. Cuando más monedas lancemos, más se aproximará la proporción al 50%.

FIG. 2



Si usamos un radar para medir la velocidad de un coche, diferentes medidas nos darán resultados diferentes. Dado que no conocemos su velocidad real, solo el resultado de la medida, cabe preguntarnos sobre su valor según la escuela bayesiana. La escuela frecuentista lo niega.

Si algo ha revelado toda la discusión anterior, es que las personas tienen enormes dificultades a la hora de razonar acerca de probabilidades condicionadas por su propia existencia. Se trata de

Según una estimación, el cerebro de un humano adulto almacena alrededor de mil millones de bits, un par de órdenes de magnitud menos que un *smartphone* de gama baja.

NICK BOSTRÖM

nuestra intuición que resulta muy complicado identificar errores en razonamientos de este tipo. Por suerte, problemas como el de la bella durmiente están forzando a físicos y matemáticos a ser más cuidadosos con el cálculo de probabilidades, de forma que, en un futuro, es posible que podamos dar un significado inequívoco a las predicciones del principio antrópico.

una de las muchas situaciones donde la teoría intuitiva de la probabilidad, con la que todas las personas nacen por defecto, se da de bruces contra la lógica matemática. Esto ocasiona grandes problemas a la hora de hacer predicciones usando el principio antrópico sobre el universo en el que nos encontramos: es tan fácil caer en sesgos de selección y tan potente

¿Es válido el principio antrópico?

El principio antrópico resulta obvio para algunos científicos, pero es considerado anatema por otros. Son muchas las críticas que ha recibido, aunque en su mayor parte se refieren al principio antrópico fuerte. En concreto, a la formulación inexacta de Tipler y Barrow.

En el año 2004, la revista electrónica *Edge* publicó un intercambio epistolar entre dos conocidos científicos neoyorquinos: por un lado, Leonard Susskind (n. 1940), inventor de la teoría de cuerdas y uno de los físicos teóricos de más prestigio del planeta; por otro, Lee Smolin (n. 1955), defensor de la gravedad cuántica de bucles —una teoría de la gravedad cuántica que mezcla la teoría de la relatividad general con la mecánica cuántica— y vigoroso crítico de la teoría de cuerdas.

La discusión entre Susskind y Smolin se centraba en el principio antrópico: mientras que Susskind lo defendía como una forma válida de razonar sobre el mundo, Smolin lo tachaba de acientífico y proponía su propia teoría del multiverso, donde cada agujero negro daba lugar a un nuevo universo, en una especie de selección natural donde los universos que generasen más agujeros negros tendrían más descendencia. El intercambio resulta interesante porque hace aflorar las típicas objeciones que algunos científicos formulan contra el principio antrópico. La respuesta de Susskind, que además de un gran físico es un gran divulgador científico, ayuda a clarificar qué afirma y qué no el principio antrópico y pone de manifiesto su base tautológica.

En su carta, Smolin niega que Weinberg usara el principio antrópico para derivar el valor de la constante cosmológica. Según Smolin, Weinberg razonó como sigue:

1. Una constante cosmológica demasiado grande impediría la formación de galaxias.
2. Las galaxias son necesarias para la existencia de observadores.
3. Sabemos que hay observadores.
4. Por lo tanto, la constante cosmológica no puede ser tan grande que impida la formación de galaxias.

Pero, argumenta Smolin, el segundo paso es completamente irrelevante. Weinberg podría habérselo ahorrado y razonar así:

1. Una constante cosmológica demasiado grande impediría la formación de galaxias.
2. Sabemos que hay galaxias.
3. Por lo tanto, la constante cosmológica no puede ser tan grande que impida la formación de galaxias.

¿Por qué hacer referencia a la presencia de observadores? ¿Por qué no centrarse simplemente en las características que observamos del universo? Para Smolin, esta opción es tan razonable como el uso del principio antrópico.

La segunda objeción de Smolin es más agresiva: afirma que el principio antrópico no es científico porque no es capaz de hacer predicción alguna. Por ejemplo, en el caso de Weinberg la presencia de observadores no añade nada: la predicción se basa en una observación empírica que es la presencia de gala-

xias. Según Smolin, una teoría que no es capaz de realizar predicciones que puedan ser falsadas por un experimento no puede ser científica.

¿Es acientífico el principio antrópico?

Susskind defiende que no solo el principio antrópico es falsable, sino que ya ha sido expuesto a examen experimental y ha sobrevivido. Según él, la presencia de observadores es una parte fundamental del razonamiento de Weinberg, que constituye el primer caso de una predicción teórica usando el principio antrópico.

En opinión de Susskind, Smolin no ha entendido el razonamiento de Weinberg. En efecto, si todo lo que importase fuese la formación de galaxias, entonces cabría esperar que la constante cosmológica fuese mucho menor que el valor máximo permitido, ya que una constante cosmológica pequeña favorece la formación de galaxias. Lo que Weinberg proponía, sin embargo, es que ese valor no podía ser mucho menor que ese valor máximo. En sus propias palabras: «Weinberg se limitaba a expresar la opinión de sentido común que afirma que, si nuestra propia existencia es la única razón por la que la constante cosmológica es pequeña, entonces es poco probable que sea mucho menor que el límite antrópico».

Lo que Weinberg estaba haciendo era, precisamente, exponer el principio antrópico a falsación experimental: si se hubiera encontrado una constante de cero, el principio antrópico habría quedado descartado, porque se trataría de un resultado improbable en extremo. Por otro lado, una constante cosmológica aproximadamente igual al máximo valor permitido es una señal inequívoca de que esta parece haber sido escogida de forma aleatoria en el rango de los valores compatibles con la vida. El razonamiento es parecido al de las reglas de varias longitudes: si obtenemos una medida de setenta centímetros, podemos deducir que nuestra regla mide alrededor de un metro: quizá dos, pero no quinientos. De la misma manera, podemos razonar a la

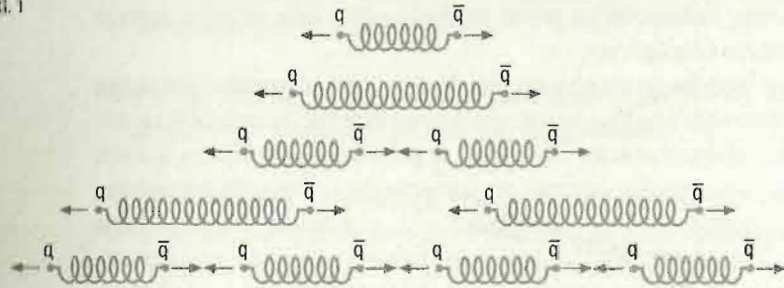
RESPALDO EXPERIMENTAL A LA CROMODINÁMICA CUÁNTICA

La cromodinámica cuántica es la teoría que gobierna las interacciones entre quarks, las partículas elementales que forman el núcleo atómico. Fue propuesta en la década de 1960 por el premio Nobel Murray Gell-Mann (n. 1929). El físico estadounidense sugirió que las características de protones y neutrones, así como las de muchas otras partículas que estaban siendo descubiertas en esas fechas, podían ser explicadas a partir de solo tres constituyentes con cargas fraccionarias, a los que bautizó como *quarks*. Hay seis tipos de quarks, aunque solo dos tipos, los *arriba* (*up*) y *abajo* (*down*) forman los protones y neutrones. Estos quarks interactúan a través de otras partículas llamadas *gluones*, que transmiten la que hoy conocemos como *fuerza nuclear fuerte*. Los quarks no pueden ser observados directamente a causa de un fenómeno llamado *confinamiento*: debido a que los gluones pueden interactuar entre ellos, la intensidad de la fuerza nuclear fuerte no disminuye con la distancia, sino que permanece constante. Esto hace que sea imposible separar dos quarks, porque se requiere una cantidad infinita de energía para ello. Además, incluso si se dispusiera de tal cantidad, la energía sobrante se usaría para crear más quarks, de forma que nunca se observase un quark desnudo, como se aprecia en la figura 1.

Quarks: no los vemos pero están ahí

A pesar de que los quarks son inobservables, hoy en día disponemos de numerosas pruebas de su existencia. Se basan en algo llamado *dispersión inelástica profunda*, que consiste en disparar un leptón —como un electrón o un positrón— hacia un protón y observar los resultados del impacto. El proceso se parece a disparar una bala contra una manzana para deducir su constitución observando los trozos en los que se rompe. La idea es que podemos usar las distribuciones angulares de los productos para determinar la estructura del protón o neutrón. Una

FIG. 1



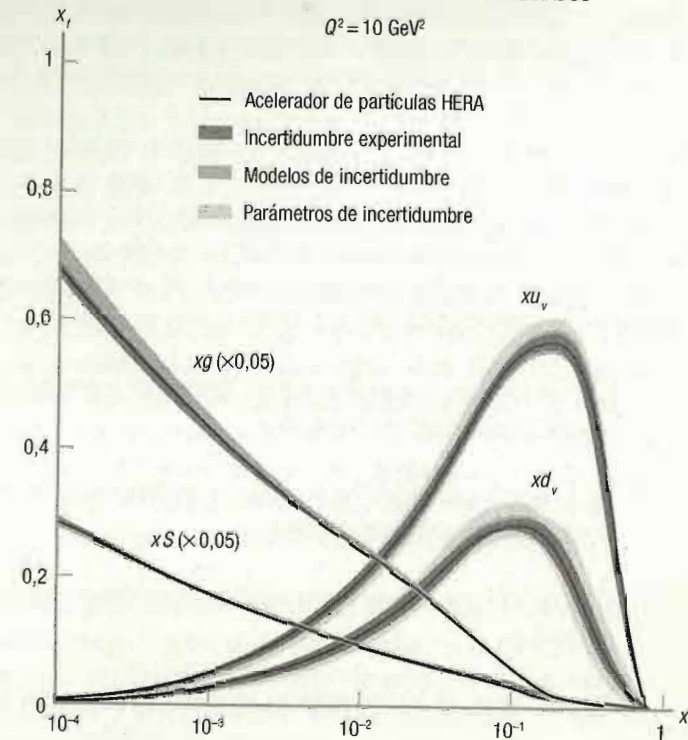
Una fuerza hacia los lados se aplica a un par quark-antiquark (arriba) unido por gluones. Este se va separando cada vez más, pero, cuando se le da suficiente energía, se crea otro par quark-antiquark en el medio (tercera fila). Se tienen ahora dos pares quark-antiquark, que tampoco pueden separarse, como se ve en la tercera y cuarta filas.

de las pistas que podemos obtener a base de la dispersión inelástica profunda es algo llamado *función de estructura* de la partícula, que nos da la probabilidad de que uno de sus constituyentes contenga una fracción x de su momento. Como se puede apreciar en la figura 2, un protón alcanza su máximo alrededor de 0,3, lo que revela que está hecho de tres partículas, cada una de las cuales tiene un tercio de su momento. Usando la dispersión inelástica profunda podemos también deducir que la carga de esas partículas es de uno o de dos tercios la carga del electrón, tal y como predice el modelo de quarks.

FIG. 2

DETECTORES DE PARTÍCULAS H1 Y ZEUS COMBINADOS

$$Q^2 = 10 \text{ GeV}^2$$



Función de estructura del protón. En el eje vertical se muestra la fracción x_F del momento del protón; en el horizontal se muestra la probabilidad de que haya una partícula con esa proporción del momento. Las líneas x_u y x_d representan los quarks up y down, respectivamente.

inversa; si una teoría predice que nuestra longitud será elegida aleatoriamente en una regla de un metro, un resultado de setenta centímetros puede ser visto como un apoyo a nuestra teoría, mientras que uno de medio milímetro no lo sería.

¿Es acientífico el multiverso?

La respuesta de Susskind parece apoyar la idea de que el principio antrópico es una teoría predictiva, a pesar de que pueda parecer lo contrario. De hecho, Susskind va más allá y da ejemplos de multitud de teorías que, en su momento, fueron consideradas acientíficas por no hacer predicciones contrastables, entre ellas la inflación de Guth.

Una de las teorías que reciben con más frecuencia el sambenito de acientífica es el multiverso. Dado que se trata de una condición necesaria para convertir al principio antrópico en algo más que una perogrullada, vale la pena entrar a considerar si esto es así.

Los argumentos de los críticos hacia el multiverso se suelen basar en una variación del siguiente razonamiento:

1. Los universos paralelos están fuera de nuestro alcance y nunca podrán ser observados.
2. Una teoría que predice entidades inobservables no es contrastable experimentalmente.
3. Una teoría que no es contrastable experimentalmente no es científica.
4. Por lo tanto, el multiverso es una teoría acientífica.

Veamos si esas objeciones aguantan una inspección crítica. Consideremos, como hace Susskind, la llamada *cromodinámica cuántica*, que es la teoría que gobierna la fuerza fuerte. La cromodinámica cuántica predice que los protones y neutrones que forman los núcleos atómicos están compuestos por otras

partículas aún más elementales, los *quarks*. Sin embargo, esa fuerza es tan intensa que los quarks nunca pueden escapar a su atracción, de forma que es imposible observar un quark aislado. Según el razonamiento anterior, esta teoría es acientífica: predice la existencia de unos objetos, los quarks, que no pueden ser observados experimentalmente. Por lo tanto, no puede ser contrastada y es acientífica.

Sin embargo, no lo es. A pesar de que predice la existencia de quarks que, en efecto, no pueden ser observados directamente, la cromodinámica cuántica hace muchas otras predicciones. Dado que todas esas predicciones han sido comprobadas en el laboratorio, tenemos multitud de razones para creer que se trata de una teoría no solo científica, sino correcta. Entonces ¿en qué falla el argumento anterior? Se trata, obviamente, del segundo punto: «una teoría que predice entidades inobservables no es contrastable experimentalmente». Esta afirmación no es correcta: que una teoría haga algunas predicciones no contrastables no significa que la teoría no sea contrastable. La teoría puede hacer un gran número de predicciones, algunas de las cuales no serán contrastables. Si una cantidad suficiente del resto se observan experimentalmente, tendremos razones para creer en ella.

Una teoría de gran aceptación como la relatividad general de Einstein hace predicciones no contrastables: por ejemplo, predice lo que pasa dentro del horizonte de sucesos de un agujero negro, una región a la que nunca tendremos acceso. También predice la geometría global del universo, incluyendo la de regiones que se encuentran más allá de nuestro universo observable. Sin embargo, a nadie se le ocurre criticar a la relatividad general como teoría acientífica.

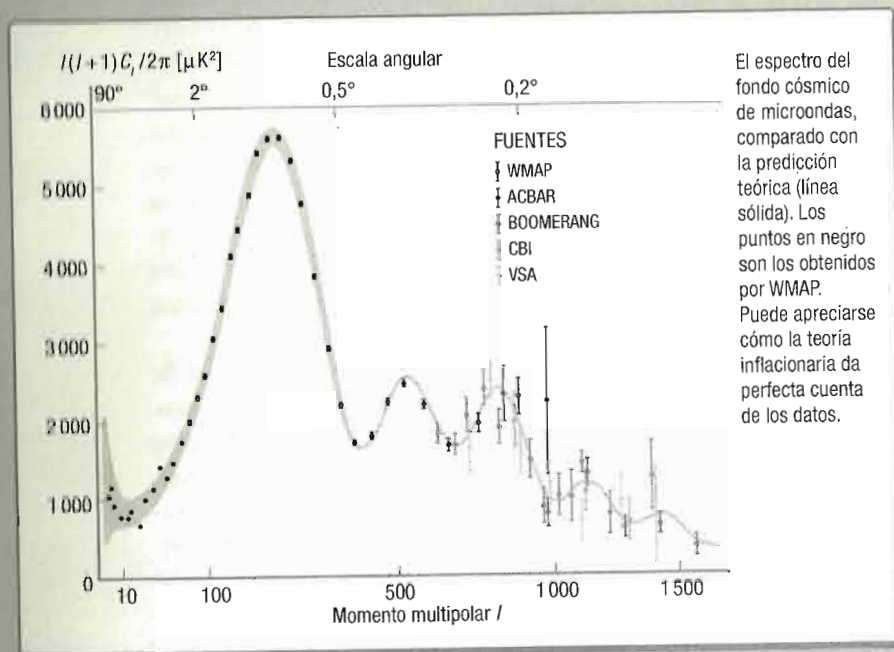
A veces surgen teorías que, al principio, pueden parecer imposibles de comprobar experimentalmente: es el caso de la in-

Obviamente la palabra «universo» no está concebida para tener plural, pero la ciencia ha evolucionado de tal manera que hoy necesitamos un sustantivo plural para dar nombre a algo similar a lo que llamamos nuestro universo.

LEONARD SUSSKIND

RESPALDO EXPERIMENTAL A LA TEORÍA DE LA INFLACIÓN

A pesar de que la teoría inflacionaria da lugar a universos no observables, muchas de sus otras predicciones han sido comprobadas experimentalmente. Para empezar, la teoría de la inflación predice que el universo tendría que ser plano, sin desviación alguna de la curvatura nula. Además, predice que tendría que ser homogéneo e isotrópico, es decir, que tendría que tener el mismo aspecto en todos sitios y en cualquier dirección. Las medidas más recientes del satélite WMAP han confirmado que el universo es homogéneo hasta una parte en 100000 y que es plano, con, como mucho, un 10% de curvatura. Aunque eso pueda no parecer mucho, hay que recordar que cualquier pequeña desviación de la planitud al principio acaba por tener efectos devastadores en poco tiempo: por lo tanto, el hecho de que la curvatura actual se encuentre tan cerca de cero significa que el universo tenía que ser perfectamente plano en sus orígenes. Además de eso, la inflación es capaz de dar cuenta de ciertas características del fondo cósmico de microondas. En particular, puede predecir la variación (fluctuaciones) de temperatura en función de su tamaño angular (la región que ocupan en el espacio), como se aprecia en el gráfico. De nuevo, los resultados del WMAP respaldan la teoría inflacionaria. Finalmente, la teoría de la inflación es la única que explica la ausencia de monopolos magnéticos, una partícula que predicen la mayoría de teorías unificadas en física de partículas.



flación de Guth que, cuando fue propuesta, recibió el mismo tipo de objeciones que se plantean contra el multiverso. No obstante, llevó a la comunidad científica menos de veinte años dar con una forma de someter la inflación a una prueba experimental y comprobar que sus predicciones eran correctas. La teoría de Guth, de nuevo, da lugar a un gran número de entidades que nunca podremos ver, en este caso los universos-burbuja que surgen de la inflación eterna. Sin embargo, hace otras predicciones que sí han sido comprobadas y que ninguna otra teoría rival es capaz de replicar. Así pues, la teoría de la inflación no solo es científica, sino que goza de gran aceptación en la comunidad, debido a su acuerdo con los resultados experimentales. Pero, si nos tomamos en serio algunas de sus predicciones, como las fluctuaciones en el fondo cósmico de microondas, también debemos tomarnos en serio las otras, en este caso la aparición de un gran número de universos-burbuja. El multiverso, pues, es una predicción inequívoca de una teoría científica respaldada por una gran mayoría de físicos en activo.

El caso del multiverso cuántico es distinto: en este caso, las dos interpretaciones rivales, la de Copenhague y la de los múltiples universos, hacen exactamente las mismas predicciones. Hasta que no se dé con una forma de distinguir entre ambas interpretaciones experimentalmente, las dos permanecerán fuera de la ciencia.

ASÍ PUES... ¿EXISTE EL MULTIVERSO?

Una vez aceptada la posibilidad de que un multiverso es una afirmación científica, nos queda aún por demostrar que es cierta: sin el multiverso, el principio antrópico es una mera tautología, es decir, una afirmación donde no se afirma nada nuevo, como «ningún soltero está casado». Veamos cuál es el estatus actual de las diferentes teorías del multiverso.

El multiverso cuántico, como se acaba de explicar, sigue en el limbo: a pesar de que la teoría de Everett está ganando aceptación, sigue sin convencer a la mayoría de los físicos. De todas

formas, como se ha visto con anterioridad, la existencia del multiverso cuántico no tiene efecto alguno en el principio antrópico, porque este necesita un mecanismo que genere universos con distintas leyes de la física, cosa que no hace la teoría de Everett.

Un multiverso que genera consenso es el que aparece al considerar la extensión infinita de nuestro universo, si este fuese plano. Los datos experimentales apuntan claramente hacia ese lado. Si ese fuera el caso, entonces existiría una infinitud de regiones separadas causalmente en las que se daría cualquier posibilidad concebible. Sin embargo, puede que las leyes de la física sean las mismas en todas esas regiones, con lo cual seguimos sin el tipo de multiverso necesario para el principio antrópico. Podría ser, en cambio, que se dieran transiciones entre vacíos en distintas regiones de nuestro universo-burbuja, así que una multiplicidad de leyes físicas no puede descartarse, incluso limitándonos a nuestro universo.

Por lo que respecta al multiverso de la inflación eterna, hoy en día la mayoría de físicos opina que hay pocas formas de evitarlo. Es decir, si la teoría de la inflación es correcta, entonces casi con toda seguridad generará una multitud de universos-burbuja entre los que se encontrará el nuestro. Puede que los tipos de universos-burbuja vengan dados por las leyes del modelo estándar que conocemos, con lo cual tendremos una cierta variedad, bastante grande, de universos. Si, como se sospecha, uno obtiene todos los universos posibles a los que dan lugar los distintos vacíos de la teoría de cuerdas, el número de universos es mucho, mucho mayor. Sea como sea, la existencia del multiverso generado por la inflación eterna es cada vez más aceptada por la comunidad científica.

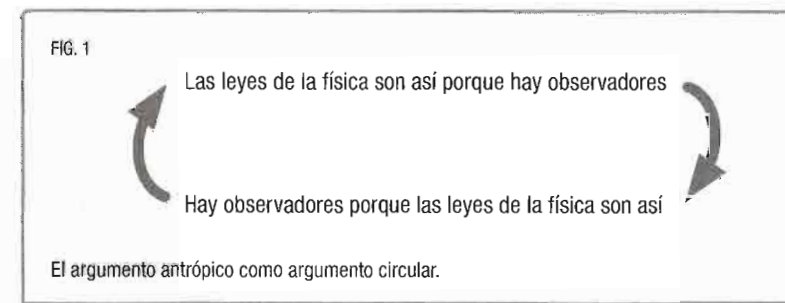
¿EXPLICA ALGO EL PRINCIPIO ANTRÓPICO?

Una crítica común al principio antrópico es su circularidad. El principio antrópico afirma que los valores de las constantes físicas son los que son porque, de no serlo, no estaríamos aquí para

verlo. Pero ¿por qué estamos aquí para verlo? Porque las constantes físicas son las que son.

Como puede apreciarse en la figura 1, si se trata de un argumento circular: A es verdad porque B es verdad porque A es verdad. Sin embargo, esto solo sucede cuando no tenemos en cuenta el multiverso. En este caso, el principio antrópico dice mucho más que eso: afirma que, de todos los universos posibles, debemos encontrarnos en el subconjunto en el que se den las condiciones para la emergencia de observadores. Si aceptamos que somos un observador elegido al azar entre todos los posibles, podemos usar esta premisa para deducir una gran cantidad de hechos sobre nuestro universo que luego podemos someter a comprobación experimental. Como se ha visto con anterioridad, los razonamientos antrópicos tienen un gran número de aplicaciones que dan resultados concretos y nada obvios para distintas situaciones. En este sentido, el principio antrópico dista mucho de ser circular.

Hasta ahora nos hemos centrado en el principio antrópico débil, que es aceptado por una gran mayoría de científicos. El principio antrópico fuerte también puede ser acusado de circularidad, dependiendo de cómo se interprete. Recordemos que el principio antrópico fuerte afirma que el universo tiene que ser tal que dé lugar a observadores inteligentes. En este caso, la clave es el «tiene que»: si significa simplemente que, dado que sabemos que hay observadores inteligentes, nuestras leyes tienen que predecir su presencia, entonces la acusación de razonamiento circular es válida, de nuevo siempre y cuando no considere-



mos la posibilidad del multiverso. Si, por el contrario, se interpreta como queriendo decir que hay algo en las leyes de la física que las obliga a producir observadores, el principio antrópico fuerte no es circular, pero es algo mucho peor. En esta versión, el principio antrópico fuerte es prácticamente indistinguible de una afirmación religiosa, aunque algunos de sus partidarios se esfuercen en enmascarar ese hecho.

Otra objeción típica, relacionada con la circularidad, es la que hace el filósofo español Jesús Mosterín, quien afirma que los defensores del principio antrópico confunden explicación con inferencia. Según Mosterín, el principio antrópico se puede usar para lo segundo, pero no para lo primero. Y da los siguientes ejemplos de explicaciones que siguen el mismo patrón que el principio antrópico:

¿Por qué llueve? Porque he abierto mi paraguas. ¿Por qué tengo una infección bacteriana? Porque estoy tomando antibióticos. ¿Por qué cometió un crimen? Porque está en la cárcel.

La crítica de Mosterín se aplica sin duda al principio antrópico en ausencia de multiverso: como muy bien indica, de nuestra presencia podemos deducir que las leyes de la física son compatibles con la vida, pero a esto no se le puede llamar una explicación en ningún sentido de la palabra. Sin embargo, sus ejemplos no son del todo justos con el principio antrópico: en este caso, nos estamos preguntando cómo nuestra condición de observadores afecta a lo que vemos. Si bien es cierto que, en presencia de un solo universo, esta observación no sirve para mucho, al considerar múltiples universos el principio antrópico sí es capaz de explicar distintas características del nuestro.

El ejemplo más claro es el de la constante cosmológica. El principio antrópico no se limita a aseverar que los observadores solo pueden existir para ciertos valores de esta, sino que hace una afirmación mucho más sutil: primero, nuestra teoría predice una colección de universos con distintas constantes cosmológicas; segundo, nosotros solo podemos encontrarnos en aquellos

donde la constante sea compatible con nuestra presencia; por lo tanto, cabe esperar que nuestro universo tenga una constante cosmológica compatible con la vida. Pero no solo eso: cabe esperar que la constante cosmológica tenga uno de los valores más probables, dentro de la restricción de que estos sean compatibles con la vida. O dicho aún mejor: esperamos que la constante cosmológica tenga un valor compatible con el hecho de haber sido escogido aleatoriamente entre las distintas posibilidades compatibles con la vida.

Como puede apreciarse, esto ni es circular ni es una perogrullada: es una explicación de por qué la constante cosmológica tiene el valor que tiene. Pero esta explicación tiene tres partes: requiere un multiverso, un mecanismo teórico que prediga universos con distintas constantes cosmológicas y, finalmente, el principio antrópico. Es decir: el principio antrópico por sí mismo no puede decirnos mucho. Tiene que combinarse con las mejores teorías de las que disponemos para dar una explicación convincente de ciertos hechos que, de otra forma, parecerían inexplicables.

¿VULNERA EL MULTIVERSO LA DEFINICIÓN DE UNIVERSO?

En su artículo «Anthropic explanations in cosmology», Jesús Mosterín critica duramente el principio antrópico. Además de las objeciones expuestas, destaca otra que suele citarse en discusiones sobre el multiverso: que este es imposible porque universo ya significa, por definición, todo lo que hay. Si el universo es todo lo que hay, no tiene ningún sentido hablar del multiverso: no puede haber múltiples regiones donde se encuentra todo lo que hay.

Por supuesto, se trata de una cuestión semántica que no tiene nada que ver con la existencia del multiverso. Por ejemplo, Alan Guth prefiere el nombre de «universos-bolsillo» para los universos que generan la inflación eterna: de esta forma, evita la confusión con la palabra «universo», que seguiría significando «todo lo que hay». Según esta definición, existe solo un univer-

so inflacionario del que surgen múltiples universos-bolsillo, que no son más que partes desconectadas causalmente del universo madre.

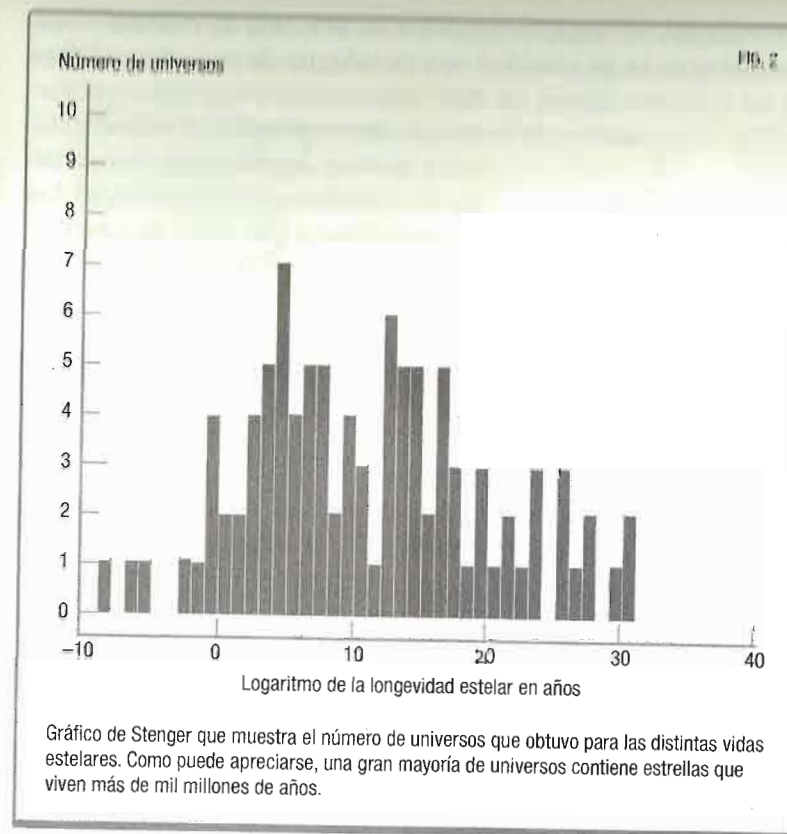
Leonard Susskind no tiene ningún problema en seguir utilizando la palabra universo para lo que, hasta hace poco, considerábamos «todo lo que hay», simplemente cambiando su significado a «nuestro universo-bolsillo». De hecho, dada la cantidad enorme de posibles universos-burbuja que genera la inflación, combinada con la teoría de cuerdas, Susskind prefiere el término «megaverso» para referirse al multiverso. Al fin y al cabo, hay muchísimos más universos de los que cabría esperar, definitivamente muchísimos más de los que predicen otras teorías que no incluyen a la teoría de cuerdas.

Escojamos el vocablo que escojamos, está claro que la objeción de la singularidad de nuestro universo es poco seria y puede ser superada con facilidad, simplemente definiendo claramente nuestros términos.

¿EXISTE EL AJUSTE FINO DE LAS CONSTANTES?

El principio antrópico fue propuesto inicialmente para explicar el ajuste fino de las constantes físicas. Si estas resultan no necesitar ajuste alguno, la necesidad del principio antrópico desaparece. El físico estadounidense Victor J. Stenger (1935-2014) sugería, en su artículo «The anthropic principle», que las pruebas a favor de un ajuste fino de las constantes han sido exageradas en la literatura científica.

Stenger argumentaba que, a pesar de que el modelo estándar tiene diecinueve parámetros libres, solo cuatro son realmente importantes para la formación de estructuras relevantes para la vida. En particular, Stenger cita la masa del electrón y el protón, así como la intensidad actual de las fuerzas electromagnética y nuclear fuerte. Stenger se dedicó a jugar con los tres primeros, estudiando cómo sus efectos afectaban al tiempo de vida de las estrellas (figura 2): descubrió que podía cambiarlos hasta en diez potencias de diez y seguía obteniendo universos donde



más de la mitad de estrellas tendrían medias de más de mil millones de años. Es decir: no existe ajuste fino de las constantes en este caso.

Stenger fue muy cuidadoso al variar sus parámetros. Mientras que la mayoría de defensores del principio antrópico lo hacían de uno en uno, Stenger se dedicó a hacerlo con varios al mismo tiempo, fijándose en cuántas regiones del espacio de posibilidades acababan con universos con estrellas longevas. Stenger llegó a la conclusión de que no eran tan improbables como algunos defensores del principio antrópico quisieran creer.

Respecto a la debilidad de la gravedad, existen explicaciones alternativas que no requieren el principio antrópico en absoluto.

Por ejemplo, en algunos modelos de la teoría de cuerdas nuestro universo es en realidad una membrana de tres dimensiones en un universo mayor, de diez dimensiones espaciales. Las partículas responsables de la fuerza electromagnética, nuclear débil y nuclear fuerte están atrapadas en la membrana, mientras que las responsables de la gravedad pueden escapar al exterior (figura 3). Esto explica por qué la fuerza de la gravedad es tanto más débil que las otras: la gran mayoría de partículas que la transmiten no se quedan en nuestro

universo, sino que viajan fuera de la membrana. Solo notamos una fracción ínfima de la fuerza real.

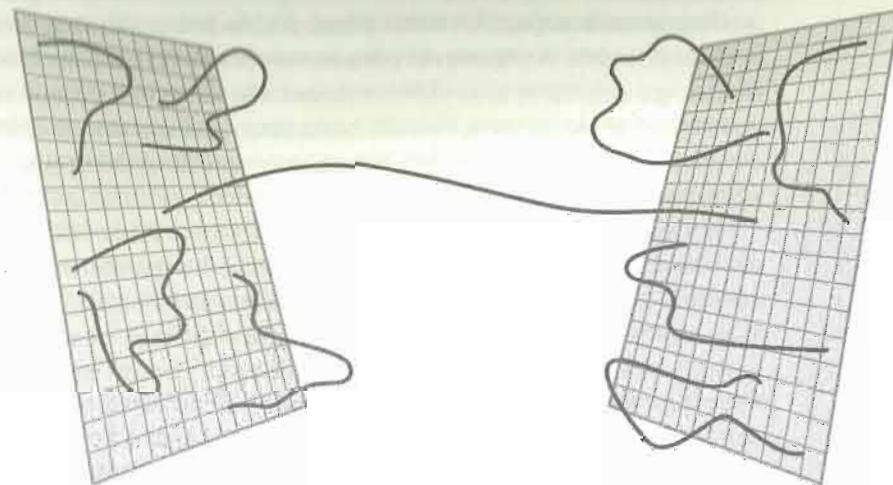
VICTOR J. STENGER

La crítica de Stenger se dirige, sin embargo, a interpretaciones religiosas del principio antrópico. En su artículo, no tiene problemas en admitir que la constante cosmológica sí representa un caso de ajuste fino y, además, hace una defensa enardecida del multiverso. De hecho, cita el artículo de Nick Boström sobre sesgos de selección al principio, mencionando que considera que el principio antrópico débil es «obvio». Es decir: Stenger critica la versión fuerte del principio antrópico y, en especial, la interpretación teleológica y teológica de Tipler y Barrow.

Esta es una situación que se da cada vez más: muchas de las críticas dirigidas al «principio antrópico» están dirigidas en realidad a la interpretación religiosa o de «causa final» que se hace en ciertos círculos con agendas fuera de la ciencia. Por desgracia, con su libro, Tipler y Barrow lograron asociar a este tipo de afirmaciones el nombre del principio antrópico, que en un inicio solo se refería al razonamiento válido de Brandon Carter.

En resumen, aunque sí es cierto que algunos autores han exagerado el grado de ajuste fino de las constantes, también lo es que, en algunos casos, el ajuste fino es innegable. La existencia de múltiples universos es una gran herramienta para fortalecer el principio antrópico débil y evitar que explicaciones pseudocientíficas se cuelen en la física, argumentando la necesidad de un diseñador para explicar los valores de las constantes de la física.

FIG. 3



El universo membrana. Nuestro universo está confinado a una membrana tridimensional, pero la gravedad escapa hacia el resto de dimensiones.

¿ES EL PRINCIPIO ANTRÓPICO UNA PROBABILIDAD MAL APLICADA?

En su ataque al principio antrópico, Mosterín razona que no se puede aplicar la teoría de la probabilidad a una sola ocurrencia. Da el siguiente ejemplo: nadie quiere comprar un billete de lotería con el número 55 555, porque parece muy improbable que salga premiado. Sin embargo, es igual de improbable que cualquier otro número.

El mismo caso se da para nuestro universo: hay números que parecen improbables, pero no tiene sentido hablar de la probabilidad de un evento que solo ocurre una vez. Un universo lleno de coincidencias es tan probable como cualquier otro. Solo si pudiéramos tener acceso a varios universos y viésemos que ciertas coincidencias se repiten en todos podríamos hacer algún tipo de afirmación sobre las mismas.

Como dice Mosterín, el universo es un suceso único, como su propio nombre indica. Podemos saber cómo es el universo, pero no tiene sentido especular sobre cómo podría haber sido *a priori*.

El argumento de Mosterín parece verosímil, en un principio. De hecho, se parece al problema de la bella durmiente: si no repetimos el experimento, no está nada claro qué queremos decir con la probabilidad de haber obtenido cruz. Sin embargo, se le pueden realizar varias objeciones.

Mosterín empieza hablando de los números de la lotería y afirma, correctamente, que el número 55555 tiene las mismas posibilidades de erigirse premiado como cualquier otro. A pesar de que, una vez lo hemos obtenido, la probabilidad de haberlo hecho es una, sí tiene sentido preguntarse qué probabilidad le hubiésemos asignado antes de escogerlo. La probabilidad es, por supuesto, $1/99999$, es decir, cada número tiene las mismas posibilidades de ser escogido. No hay nada incorrecto en preguntarse cuál era la probabilidad de haber obtenido ese número *a priori*.

Así pues, el argumento de Mosterín parece tener dos partes: por un lado, dice que no tiene sentido preguntarse por la probabilidad de algo que sucede una vez. Por otro, afirma que, si suponemos que todos los valores de las constantes son, de entrada, igualmente probables, no tiene sentido maravillarse por haber obtenido los actuales. Los dos argumentos parecen ser mutuamente excluyentes: o bien tiene sentido preguntarse por las probabilidades *a priori* o bien no lo tiene.

Lo que sí parece tener sentido es preguntarse por las probabilidades existentes *a priori*, como acabamos de ver. En este caso, dado que no tenemos más datos sobre qué universos son posibles, deberíamos asumir como primera hipótesis que todos los valores de las constantes son igualmente improbables, como en el caso de la lotería. Sin embargo, el número 55555 parecía especial pero no lo era: se trata solo de un número cualquiera, como veremos por ejemplo si lo expresamos en binario. Pero nuestro universo no es un universo cualquiera: es un universo que contiene observadores. Si calculamos la probabilidad *a priori* de que nuestro universo contenga observadores, vemos

que esa probabilidad es prácticamente cero: como mucho, de una entre 10^{120} , si nos fijamos en el valor de la constante cosmológica. Tenemos ahora dos opciones: la primera es negar que exista la posibilidad de otros valores, ya que el universo es único. Si ese es el caso, tenemos que explicar por qué las leyes de la física fuerzan que la constante cosmológica tenga esa magnitud. La segunda es afirmar que la constante cosmológica es la que es y punto. Entonces tenemos que explicar por qué se ha dado una coincidencia de uno entre 10^{120} .

La tercera opción, que Mosterín niega, es suponer que existen múltiples universos, en cuyo caso no hay nada que explicar y el misterio se desvanece. La existencia de múltiples universos neutraliza la crítica de Mosterín: muchas de las teorías físicas actuales predicen el multiverso, así que su existencia no se deriva del principio antrópico, sino de muchas otras consideraciones. Si aceptamos que existe el multiverso, los cálculos de probabilidades en él pasan a tener sentido: nuestro universo ya no es único, así que podemos considerar la probabilidad de obtener los distintos tipos. En este caso el principio antrópico nos ayuda a explicar coincidencias que, de otra forma, requerirían o bien de un encogimiento de hombros o de una intervención divina. El multiverso es, en la opinión de una mayoría de físicos, el menor de estos males.

SESGO ANTRÓPICO Y LEYES DE LA FÍSICA

Se ha discutido el papel del principio antrópico a la hora de explicar distintas características de nuestro universo. Además, el principio antrópico nos puede ayudar en nuestra búsqueda de las leyes finales de la física.

Hasta hace poco, los físicos trabajaban dando por sentado que las leyes que observamos son las únicas que hay y se veían obligados a explicar ciertos aspectos que parecían más arbitrarios que verdades profundas sobre el cosmos. Hoy en día somos conscientes de que nuestro propio papel como observadores hace que observemos tan solo una parte especial del multiverso. El ser conscientes de nuestro sesgo es el primer paso para

aprender a razonar sin él, buscando las propiedades comunes entre nuestro universo y el resto, hasta dar con las leyes finales que se apliquen a todos.

En este sentido, el principio antrópico nos da una guía sobre cómo razonar sobre el mundo. De la misma forma que un historiador tiene que esforzarse para evitar interpretar el pasado desde la óptica del presente, un físico debe también aprender a mirar el universo deshaciéndose de los prejuicios sobre nuestra región local. Se trata de una tarea titánica, que requiere desprenderse de una serie de datos que damos por sentado, como la existencia de tres dimensiones del espacio o, incluso, la realidad del espacio-tiempo.

Esta forma de razonar, al margen de la experiencia inmediata, pone nerviosa a mucha gente, que teme que la física acabe divorciada del experimento, convertida en una disciplina más filosófica que científica. Pero, como se ha visto, es un temor infundado: incluso una teoría tan lejana de nuestra realidad cotidiana como la inflación cósmica ha podido ser comprobada experimentalmente. Es una cuestión de tiempo que descubramos un efecto experimental de la teoría de cuerdas que podamos comprobar en el laboratorio. Hasta entonces, habrá que confiar en la creatividad de todos aquellos físicos teóricos y experimentales que, una y otra vez, encuentran nuevas formas de seguir adelante.

- ALONSO, J.M., *Introducción al principio antrópico*, Madrid, Ediciones Encuentro, S.A., 1989.
- DAVIES, P., *La mente de Dios*, Madrid, McGraw-Hill Interamericana de España S.L., 1993.
- DEUTSCH, D., *La estructura de la realidad*, Barcelona, Anagrama, 2002.
- GREENE, B., *El universo elegante. Supercuerdas, dimensiones ocultas y la búsqueda de la teoría definitiva*, Barcelona, Crítica, 2011.
- HOGAN, C.J., *El libro del Big Bang*, Barcelona, Alianza, 2005.
- KRAGH, H., *Historia de la cosmología. De los mitos al universo inflacionario*, Barcelona, Crítica, 2008.
- KRAUSS, L.M., *Un universo de la nada*, Barcelona, Ediciones de Pasado y Presente, 2015.
- REES, M., *Seis números nada más*, Madrid, Debate, 2001.
- SUSSKIND, L., *El paisaje cósmico. Teoría de cuerdas y el mito del diseño inteligente*, Barcelona, Crítica, 2007.
- TEGMARK, M., *Nuestro universo matemático*, Barcelona, Antoni Bosch Editor, 2015.

- ajuste fino de las constantes 8,
10, 23, 30, 40, 41, 56, 65, 69, 86,
106, 154-156
AlphaGo 97, 100
antrópico
 débil, principio 44-46, 62, 151,
 156
 fuerte, principio 44, 45, 47, 48,
 139, 151, 152
 participativo, principio 48, 52,
 53, 66
 razonamiento 7, 10, 35, 39, 40,
 53, 56, 58, 69, 84, 86, 92, 105,
 117, 122, 128-130
Atkins, Peter 107
automuestreo, asunción de 54,
 55, 58, 102, 117
Barrow, John D. 45-48, 52, 53,
 139, 156
bayesiana, probabilidad 136,
 137
bebé, paradoja del 127, 128
bella durmiente, problema de la
 130-135, 138, 158
 extrema 133
Big Bang, teoría del 22, 24, 44,
 108
Blue Brain Project 98
Böstrom, Nick 10, 11, 45, 46, 53,
 54, 56, 58, 104, 105, 126, 127,
 130, 133, 135, 138, 156
burbuja, universo 9, 10, 76-78,
 88-89, 106, 112, 113, 149, 150,
 154
Calabi-Yau, espacios de 88, 89
campo 76, 83, 91, 111
Carroll, Sean 132
Carter, Brandon 44, 46, 47, 53,
 58, 59, 156
circular, argumento 150-153
columna cortical 98, 99
compactificación 87, 88

constante cosmológica 8, 9, 20,
 22, 30, 31, 34-37, 39, 40, 43,
 56-58, 62, 75, 78, 86, 89, 92,
 142, 143, 152, 153, 156, 159
 Copenhague, interpretación de
 49, 52, 66-68, 149
 cuántica
 cromodinámica 144, 146, 147
 mecánica 28-30, 32, 48, 50,
 67-69, 75, 77, 79, 86, 105,
 106, 112, 141, 156
 cuerdas
 paisaje de la teoría de 8, 86,
 105, 112
 teoría de 8, 10, 18, 40, 67, 79,
 86-90, 92, 93, 105, 106, 141,
 150, 154, 156, 160
 curvatura 23, 24, 25, 28, 148

 Davies, Paul 8, 11, 65, 107-109
 Delahaye, Jean-Paul 127
 densidad crítica 25, 26, 28
 Descartes, René 95
 Drake, ecuación de 61

 Einstein, Albert 8, 20, 22, 23, 31,
 34, 37, 147
 electrodébil, fuerza 83
 entrelazamiento 50-52
 espacio, colonización del 125,
 126
 espacio-tiempo 23, 86, 160
 estándar, modelo 15, 16, 18, 31,
 34, 36, 39, 82-85, 111, 150, 154
 Everett III, Hugh 67, 69, 112, 149,
 150

 falsable, teoría 143
 fase, cambio de 81
 frecuentista, probabilidad 136,
 137

 función de onda, colapso de 49

 general, relatividad 20, 23, 31,
 141, 147
 Gott III, John Richard 119
 Guth, Alan 9, 28-30, 56, 62, 67,
 76, 146, 149, 153

 Higgs, bosón de 16, 36, 37-39, 83,
 84
 Hubble, Edwin 21

 incertidumbre, principio de 28,
 29, 32, 33, 38, 61, 79, 102, 132,
 145
 inflación
 caótica 78, 79, 84, 86, 88, 89,
 112
 cósmica 28, 90, 160
 eterna 78, 106, 149, 150, 153
 interacción fuerte 17
it from bit 48, 114

 jerarquía, problema de la 36, 39,
 40, 109
 juicio final, argumento del 119,
 125, 126-130

 Linde, Andréi 78, 89, 92
 Lloyd, Seth 102, 103

 Markram, Henry 101
 mediocridad, principio de 21,
 44
 megaverso 10, 154
 monopolio magnético 76, 148
 Mosterín, Jesús 74, 75, 152, 153,
 157-159
 múltiples universos,
 interpretación de 67, 68, 69,
 75, 77, 133

multiverso 9, 10, 65, 67, 69, 70,
 75, 78, 84, 86, 88, 93, 105-110,
 113-114, 132, 134, 135, 141,
 146, 149-154, 156, 159

 nacimientos, reloj de 123, 124,
 129
 neuronal, red 98, 100

 observable, universo 17, 26, 69,
 71, 147
 observadores artificiales 96

 Planck, longitud de 75
 planitud, problema de la 26, 28,
 30, 69, 76, 112, 148

 radiación de fondo 26
 Rees, Martin 8, 18, 34
 referencia, clase de 127, 128,
 130, 134
 reposo, masa en 38

 Sagan, Carl 58
 Sedol, Lee 97
 selección, sesgo de 10, 53, 59, 60
 simetría, rotura espontánea de la
 79, 80, 82-84
 simulación, argumento de la 104

 simulados, universos 11, 107
 Smolin, Lee 141-143
 solipsismo 108
 Stenger, Victor J. 154-156
 supernova 30, 31, 58
 supersimetría 39
 supersimétrica, extensión
 mínima 84, 85
 Susskind, Leonard 141-143, 146,
 147, 154

 Tegmark, Max 70, 72-74, 112-114
 Tipler, Frank 44-48, 52, 53, 139,
 156

 vacío
 energía de 28, 29, 31, 57, 58,
 77
 falso 29, 76-79, 88
 verdadero 76-78
 Vilenkin, Alexander 35, 57, 58

 Weinberg, Steven 34, 35, 56, 57,
 142, 143
 Wheeler, John Archibald 48, 52,
 114
 WMAP 26, 148

 Zuboff, Arnold 131

El principio antrópico

Los desarrollos en la física de las últimas décadas han dado lugar a un descubrimiento inquietante: nuestro universo podría haber sido muy distinto. De hecho, de todos los universos posibles, el nuestro es de los pocos que permiten la aparición de observadores inteligentes. ¿Por qué hemos tenido tanta suerte? El principio antrópico argumenta que no se trata de una coincidencia: nuestra propia existencia determina las leyes que observamos por el simple hecho de que un universo sin observadores no contiene a nadie que se pregunte por él.

Eduardo Arroyo es físico, escritor y divulgador científico.